

Titre: Détection et communication intégrées pour les débris spatiaux : un nouveau cadre pour une sécurité orbitale améliorée

Auteur: Gedeon Ghislain Nkwewo Ngoufo

Date: 2025

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Nkwewo Ngoufo, G. G. (2025). Détection et communication intégrées pour les débris spatiaux : un nouveau cadre pour une sécurité orbitale améliorée [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/64837/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/64837/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Gunes Karabulut Kurt, & Elham Baladi
Advisors:

Programme: Génie électrique
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

**Détection et communication intégrées pour les débris spatiaux : un nouveau
cadre pour une sécurité orbitale améliorée**

GEDEON GHISLAIN NKWEWO NGOUFO

Département de génie électrique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*
Génie électrique

Février 2025

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

**Détection et communication intégrées pour les débris spatiaux : un nouveau
cadre pour une sécurité orbitale améliorée**

présenté par **Gedeon Ghislain NKWEWO NGOUFO**
en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Sébastien LORANGER, président

Gunes KARABULUT KURT, membre et directrice de recherche

Elham BALADI, membre et codirectrice de recherche

Tayeb DENIDNI, membre

DÉDICACE

À ma famille

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce projet de mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner ma gratitude. Je souhaite avant tout remercier ma directrice de recherche, la professeure Güneş Karabulut-Kurt, pour le temps qu'elle a consacré à m'apporter les outils méthodologiques indispensables à la conduite de cette recherche, ses enseignements et pour avoir constitué le jury. Son exigence m'a grandement stimulé.

Je remercie en particulier ma codirectrice, la professeure Elham Baladi, pour les ressources obtenues durant ce projet. Je tiens également à remercier le docteur Khaled Humadi, pour son temps, son soutien et sa franche collaboration dans l'aboutissement de ce mémoire.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à l'Agence spatiale canadienne (ASC). Cette recherche n'aurait pas été possible sans les précieuses ressources fournies par l'ASC, qui ont permis de faire progresser l'innovation et l'exploration dans le domaine des sciences et technologies spatiales.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers mon agente préférée, Lissa Gervais, ainsi que l'administration et le personnel du département de génie électrique, le service aux étudiants de Polytechnique (SEP), ainsi que mes amis et collègues, pour leur soutien moral et intellectuel tout au long de ma démarche, qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

Enfin, je remercie ma famille du Cameroun qui, malgré la distance, a su prendre soin de moi et s'intéresser à mon projet de recherche.

À mon défunt père, qu'il repose en paix. Que mon épouse, Jean-Christelle, mon défunt fils, Salathiel, ainsi que mes filles chéries, Magnificat et Grace, trouvent ici l'expression de mon amour et de mes sentiments renouvelés.

RÉSUMÉ

La prolifération des débris spatiaux en orbite terrestre basse (LEO) constitue un défi majeur pour la durabilité des missions spatiales et la sécurité des constellations de satellites. Ces débris, générés par des satellites désaffectés, des fragments de collisions ou des étapes de lancement, augmentent considérablement les risques de collisions, menaçant les opérations orbitales et favorisant un scénario de syndrome de Kessler. Les systèmes de Détection et Communication Intégrées (ISAC) émergent comme une solution prometteuse en combinant les fonctions de détection radar et de communication dans un cadre unifié, permettant ainsi une gestion efficace des ressources orbitales. Ce mémoire s'appuie sur une analyse comparative approfondie entre des signaux modulés en fréquence linéaire (LFM) et des formes d'ondes sinusoïdales classiques à la fréquence de 5 GHz. Ces signaux ont été évalués en termes de précision pour la détection des distances et des vitesses des débris, tout en garantissant des performances de communication robustes. Les résultats démontrent que les signaux en chirp réduisent efficacement les ambiguïtés de distance-Doppler, offrant une précision accrue dans des environnements à conditions de canal variées. Bien que les signaux sinusoïdaux soient plus simples à mettre en œuvre, ils se révèlent moins performants pour les scénarios complexes. En complément, des techniques de modulation avancées, telles que le codage spatial par décalage de phase (SSK), ont permis d'optimiser le compromis entre le taux d'erreur binaire (BER) et la précision de détection, améliorant ainsi l'efficacité spectrale et énergétique des systèmes ISAC. Par ailleurs, cette étude explore dans la revue de littérature les bénéfices des protocoles multiporteuses et une étude comparative des récentes avancées dans les systèmes ISAC, pour renforcer les capacités de détection et de communication dans des environnements à forte mobilité. Elle souligne également le rôle des techniques d'apprentissage automatique pour améliorer la précision de détection et modéliser efficacement des scénarios complexes de gestion des débris spatiaux. Les conclusions de ce mémoire offrent une flexibilité accrue dans le choix et la conception des formes d'onde, posant les bases pour des solutions ISAC évolutives. Ces systèmes permettent non seulement de relever les défis actuels liés à la gestion des débris spatiaux, mais ouvrent également la voie à des applications futures dans des domaines tels que la surveillance environnementale, les communications inter-satellites et les systèmes autonomes.

ABSTRACT

The proliferation of space debris in low Earth orbit (LEO) poses a significant challenge to the sustainability of space missions and the safety of satellite constellations. Generated by decommissioned satellites, collision fragments, and launch vehicle stages, this debris significantly increases the risk of orbital collisions, threatening operational security and exacerbating the potential for a Kessler Syndrome scenario. Integrated Sensing and Communication (ISAC) systems offer a promising solution by unifying radar sensing and communication functionalities within a single framework, enabling more efficient management of orbital resources. This thesis presents a comparative analysis of linear frequency-modulated (LFM) waveforms at 5 GHz and standard sinusoidal waveforms. These signals were evaluated in terms of their ability to detect the range and velocity of space debris with high precision while ensuring robust communication performance. The findings demonstrate that chirp waveforms effectively mitigate range-Doppler ambiguities, providing superior accuracy across various channel conditions. While sinusoidal waveforms are simpler to implement, they are less effective in more demanding scenarios. Advanced modulation techniques, such as Spatial Shift Keying (SSK), were employed to optimize the trade-off between bit error rate (BER) and sensing accuracy, thereby enhancing the spectral and energy efficiency of ISAC systems. Additionally, the study explores, in the literature review, the benefits of multi-carrier protocols and a comparative study of recent advances in ISAC systems to enhance detection and communication capabilities in high-mobility environments. It also highlights the role of Machine Learning techniques in improving sensing precision and effectively modeling complex scenarios for managing space debris. The conclusions of this research provide increased flexibility in waveform design and selection, laying the foundation for scalable ISAC solutions. These systems not only address current challenges in space debris management but also pave the way for future applications in areas such as environmental monitoring, inter-satellite communications, and autonomous systems.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iii
REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	vi
LISTE DES TABLEAUX	ix
LISTE DES FIGURES	x
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xi
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Éléments de la problématique	3
1.2 Objectifs de recherche	3
1.3 Méthodologie	3
1.4 Contributions	4
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	6
2.1 Problème des débris spaciaux et technique de détection	6
2.1.1 Problème des débris spaciaux	6
2.1.2 Techniques de détections	7
2.2 ISAC : Détection et Communication Intégrées	9
2.2.1 Systemes de communications à Portée unique pour ISAC	9
2.2.2 Systemes de commication à Multi-porteuse pour ISAC : OFDM, OTFS et défis	10
2.2.3 Détection basée sur l'apprentissage machine	13
2.3 Classification des systèmes radar pour ISAC et la détection de débris	15
2.4 Model de pertes	17
2.5 Analyse comparative de la littérature	18
2.6 Gaps dans la littérature	21
CHAPITRE 3 ÉTUDE DE LA MODULATION SSK	22
3.1 Introduction	22
3.2 Principe de transmission en SSK	22

3.2.1	Modèle mathématique	22
3.2.2	Détection par Maximum de Vraisemblance (ML)	23
3.2.3	Probabilité d'erreur de détection	23
3.3	Analyse des performances	23
3.3.1	Probabilité d'erreur binaire	24
3.3.2	Ordre de diversité	25
3.3.3	Impact des paramètres du système sur la performance	25
3.3.4	Comparaison avec d'autres modulations MIMO	28
3.4	Conclusion	28
CHAPITRE 4 APPLICATION DE LA MODULATION SSK POUR LA COMMU- NICATION ET LA DÉTECTION		30
4.1	Description du système	30
4.1.1	Émetteur	31
4.1.2	Récepteur	32
4.2	Analyse de la Communication et de la Détection des Débris	33
4.2.1	Analyse du lien de communication basé sur SSK	33
4.2.2	Analyse des signaux radar et d'écho	40
4.3	Résultats numériques	42
CHAPITRE 5 CONCLUSION		46
5.1	Synthèse des travaux	46
5.2	Améliorations futures	46
RÉFÉRENCES		48

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Classification des debris [1]	6
Tableau 2.2	Classification des radars par type, fréquence, résolution et utilisation	17
Tableau 2.3	Revue comparative de la littérature.	19
Tableau 2.4	Résumé basé sur la performance	20
Tableau 3.1	Comparaison des techniques de modulation MIMO.	28
Tableau 4.1	Paramètres de simulation	43

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Pollution par les débris spatiaux. Source : National Géographie	7
Figure 3.1	Taux d'erreur binaire pour $N_t = 4$ et 32, avec $\mu = \omega = 2$, canal de Nakagami.	26
Figure 3.2	Taux d'erreur binaire pour $N_t = 4$ et 32, canal de Rayleigh	27
Figure 3.3	Comparaison de l'efficacité spectrale entre SSK, GSSK et les techniques SM	28
Figure 4.1	Modèle du système proposé pour la détection et la communication. .	31
Figure 4.2	Bloc diagramme de l'émetteur et du récepteur	33
Figure 4.3	Spectrogramme des formes d'ondes chirp montante et descendante . .	35
Figure 4.4	Taux d'erreur binaire pour $N_t = 4, 8, 16$ et 32, canal de Rice	44
Figure 4.5	Comparaison de la précision de la portée et de la vitesse entre les formes d'onde chirp et sinusoïdales.	45

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ADR	Active Debris Removal
AI	Artificial Intelligence
BER	Bit Error Rate
CSI	Channel State Information
CSS	Chirp Spread Spectrum
FMCW	Frequency-Modulated Continuous-Wave
FSPL	Free-Space Path Loss
GFDM	Generalized Frequency Division Multiplexing
GSSK	Generalized Spatial Shift Keying
ISAC	Integrated Sensing and Communication
LFM	Linear Frequency Modulation
LEO	Low Earth Orbit
ML	Machine Learning
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OTFS	Orthogonal Time Frequency Space
PSK	Phase Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
RIS	Reconfigurable Intelligent Surface
SC	Single Carrier
SDR	Software-Defined Radio
SM	Spatial Modulation
SSK	Spatial Shift Keying
THz	Terahertz

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

L'expansion rapide des déploiements de satellites et des méga-constellations a révolutionné les opérations spatiales, offrant des opportunités sans précédent tout en posant des défis majeurs. L'augmentation de la densité des actifs en orbite amplifie les risques de collision, menaçant la durabilité des missions spatiales. Afin d'atténuer ces risques, des systèmes avancés de détection et de surveillance des débris spatiaux sont indispensables. Cependant, les solutions actuelles ne parviennent souvent pas à répondre aux défis simultanés de la précision de détection et de l'efficacité des communications.

Les technologies émergentes, telles que l'ISAC, offrent une voie prometteuse pour surmonter ces limitations. En intégrant de manière transparente les capacités radar et de communication, les systèmes ISAC proposent un cadre unifié pour la détection des débris et la transmission fiable des données. Néanmoins, le déploiement de ces systèmes introduit des défis complexes à l'intersection de l'ingénierie des communications, de la technologie radar et du traitement du signal. Ces défis incluent la conception des formes d'onde, la modélisation Doppler et la mise en œuvre efficace des systèmes conjoints de détection et de communication, chacun étant crucial pour atteindre des performances optimales en matière de détection des débris et de communication spatiale.

Enjeux

Les dynamiques de détection des débris spatiaux sont influencées par plusieurs facteurs, tels que la section efficace du radar, la vitesse, l'altitude, les pertes et la différenciation des débris. De plus, les décalages Doppler induits par le mouvement relatif dans l'espace nécessitent des techniques de traitement du signal hautement adaptatives. L'intégration des systèmes ISAC permet de répondre à ces complexités en assurant des fonctionnalités conjointes de communication et de détection.

Les techniques d'apprentissage automatique pourraient renforcer davantage ces capacités, offrant des outils pour améliorer la précision de la détection radar, optimiser l'allocation des ressources et modéliser de manière adaptative le comportement des scénarios complexes de débris. Ces avancées ouvrent la voie à une identification robuste des débris spatiaux tout en maintenant des performances de communication fluides.

Le succès des systèmes ISAC repose sur la compréhension et l'atténuation des défis liés à la propagation du signal dans l'espace, notamment le désalignement, les pertes de polarisation

et les erreurs de fabrication des antennes. Ces facteurs n'affectent pas seulement la couche physique, mais peuvent également engendrer des inefficacités à des niveaux plus élevés du système. Les aborder de manière globale est essentiel pour développer les systèmes de nouvelle génération capables d'effectuer plusieurs tâches dans l'espace, comme les essaims de drones ou les constellations de satellites équipées d'antennes MIMO.

Ce mémoire aborde les défis cruciaux de la détection des débris spatiaux et de la communication à une époque d'expansion des opérations spatiales. En intégrant des systèmes radar et de communication avancés, elle vise à apporter des solutions novatrices qui font progresser le domaine de l'ingénierie spatiale et garantissent la durabilité à long terme des environnements orbitaux.

1.1 Éléments de la problématique

La problématique centrale de ce mémoire réside dans la complexité croissante de la détection et de la gestion des débris spatiaux dans un contexte d'intensification des activités orbitales. Cette complexité est alimentée par la diversité des paramètres physiques (vitesse, altitude, pertes de signal, section radar), les décalages Doppler dus au mouvement relatif, ainsi que par la nécessité de distinguer efficacement les débris. Par ailleurs, les contraintes liées à la propagation des signaux dans l'espace, telles que le désalignement, les pertes de polarisation ou encore les imperfections matérielles, compromettent la fiabilité des systèmes. Face à ces enjeux, l'intégration des systèmes ISAC, apparaît comme une piste prometteuse pour surmonter ces défis en proposant une approche conjointe et adaptative de la détection et de la communication.

1.2 Objectifs de recherche

Les principaux objectifs de notre recherche sont :

- **Élaborer une revue de littérature comparative sur les récentes avancées technologiques dans les systèmes ISAC** : Analyser les études effectuées en fonction de leurs contributions, défis et applicabilité aux cadres ISAC pour la détection des débris spatiaux, en synthétisant les résultats.
- **Amélioration de la détection et de la communication grâce à de nouvelles techniques de modulation** : Évaluer les performances de la modulation à codage spatial par décalage (SSK), ainsi que la conception des formes d'onde pour la communication et la détection. Estimer la précision de détection de la distance et de la vitesse des débris spatiaux.
- **Améliorer les performances des systèmes ISAC** : Proposer un model conjoint, intégrant à la fois la détection, la communication et l'implémentation d'une nouvelle forme d'onde. Étudier des performances du model en termes de taux d'erreur binaire, SNR, efficacité spectrale et précision, sous différents scénarios de propagation.

1.3 Méthodologie

Afin d'atteindre les objectifs de notre mémoire, les étapes suivantes sont envisagées :

- **Modélisation des paramètres et simulations** : Cette étape consiste à analyser les caractéristiques physiques des débris spatiaux, telles que la distance, la vitesse, l'altitude et la section efficace radar, dans des scénarios de détection. Étudier les

techniques de modulation existante, les conditions de canal et des paramètres en orbite basse afin d'assurer une représentation précise de notre système.

- **Conception et adaptation des formes d'onde** : Cette étape vise à améliorer les conceptions existantes, telles que les formes d'onde up-chirp et down-chirp en comparaison avec les formes d'onde sinusoïdale standard et des techniques de modulation avancées, afin d'améliorer les performances. Ces conceptions sont ajustées pour équilibrer le débit des communications et la précision de détection des débris. Des simulations sont réalisées pour évaluer les performances radar à l'aide de métriques telles que le taux d'erreur binaire, le rapport signal/bruit et la diversité du décalage Doppler. Des techniques avancées, notamment la modulation par index, sont intégrées pour améliorer l'efficacité spectrale et énergétique du système ISAC.
- **Analyse des performances** : Cette étape vise à analyser les performances de communication et de détection de différentes formes d'onde, qui sont évaluées de manière comparative, en exploitant les résultats des simulations pour affiner le modèle de propagation. Cette approche permet de valider l'efficacité du modèle en alignant les résultats avec les analyses théoriques des formes d'onde.

Cette méthodologie garantit une approche globale pour contribuer aux défis liés à la détection des débris spatiaux en orbite basse.

1.4 Contributions

Les principales contributions de notre travail peuvent être résumées comme suit :

- Introduction d'un nouveau système ISAC qui intègre la modulation par index SSK pour les systèmes satellites en orbite basse (LEO). Le système proposé est spécifiquement conçu pour répondre aux deux défis de la détection des débris orbitaux et de la communication fiable dans l'espace. En exploitant le domaine spatial pour l'encodage des données, le SSK offre une technique de modulation simplifiée mais efficace qui améliore les performances globales du système tout en maintenant une faible complexité.
- Étude des performances du taux d'erreur binaire (BER) du lien de communication dans les systèmes ISAC activés par SSK. Il est montré que les formes d'onde en chirp et sinusoïdales obtiennent des performances BER similaires, quel que soit le nombre d'antennes de transmission. Cela souligne la flexibilité dans le choix des formes d'onde pour le lien de communication, permettant aux concepteurs de privilégier la précision de détection ou la simplicité en fonction des exigences spécifiques de l'application.
- Réalisation de simulations de Monte Carlo pour valider les performances du système,

y compris le BER de communication, la précision de détection pour la portée et la vitesse. Les résultats des simulations confirment que bien que les deux formes d'onde offrent les mêmes performances en termes de BER, la forme d'onde en chirp surpasse systématiquement la forme d'onde sinusoïdale en termes de précision de détection de la portée et de précision de la vitesse.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Problème des débris spatiaux et technique de détection

2.1.1 Problème des débris spatiaux

Le problème des débris spatiaux est devenu un défi de plus en plus critique pour la durabilité des opérations spatiales. L'accumulation de débris provenant de satellites hors service, de stades de fusées épuisés et de fragments issus de collisions représente des risques considérables pour les satellites actifs et les futures missions spatiales. Les estimations actuelles suggèrent que plus de 130 millions de morceaux de débris mesurent moins de 1 cm, environ 1 million mesurent entre 1 et 10 cm, et plus de 34 000 sont plus grands que 10 cm en orbite autour de la Terre [2]. Ces objets, voyageant à des vitesses pouvant atteindre 28 000 km/h, peuvent causer des dommages graves aux vaisseaux spatiaux opérationnels et augmenter le risque de fragmentation supplémentaire, menant à ce que l'on appelle souvent le « Syndrome de Kessler » [3] — une réaction en chaîne de collisions qui augmente la densité des débris en orbite terrestre.

TABLEAU 2.1 Classification des débris [1]

Altitude	Taille du débris	Vitesse du débris (km/s)	Nombre de débris
LEO (< 2000 km)	>10 cm	7-8 km/s	>34,000
	1-10 cm	7-8 km/s	1 millions
	<1 cm	7-8 km/s	>100millions
MEO (2000-35,786 km)	>10 cm	3-4 km/s	25,000
	1-10 cm	3-4 km/s	150,000
	<1 cm	3-4 km/s	>200millions
GEO (35,786 km)	>10 cm	3 km/s	3,000
	1-10 cm	3 km/s	20,000
	<1 cm	3 km/s	200,000

Le « Syndrome de Kessler », décrit par Kessler et Cour-Palais, met en garde contre le potentiel de collisions en chaîne qui pourraient augmenter de manière exponentielle la population de débris. Ce problème est aggravé par le nombre croissant de constellations de satellites commerciaux et gouvernementaux, telles que Starlink de SpaceX et Kuiper d'Amazon, qui multiplient la probabilité de génération de débris [4]– [5].

Les recherches de [6] mettent en évidence les impacts économiques et opérationnels des col-

lisions de débris, soulignant la nécessité de réponses politiques et technologiques plus fortes. De plus, des études comme celles de [7] insistent sur l'importance de la collaboration internationale pour atténuer la croissance des populations de débris grâce à l'élimination active des débris (ADR) et à l'amélioration du suivi des débris.



FIGURE 2.1 Pollution par les débris spatiaux. Source : National Géographie

2.1.2 Techniques de détections

Les techniques traditionnelles de détection des débris spatiaux basées au sol impliquent des radars et des capteurs optiques. Les radars terrestres, tels que le radar Haystack et le radar Goldstone, ont montré une grande efficacité pour suivre des objets aussi petits que 5 cm en orbite basse (LEO) [8]. Les progrès réalisés dans les techniques de détection par radiofréquence (RF) et infrarouge (IR) ont élargi les capacités des systèmes de surveillance des débris. Ces systèmes sont particulièrement efficaces pour identifier les fragments de débris plus petits, difficiles à détecter avec les radars traditionnels. Les travaux de [9] explorent l'utilisation de capteurs d'étoiles, généralement utilisés pour la navigation des satellites, en tant qu'outils pour la détection des débris spatiaux. Son étude a démontré la capacité de plusieurs capteurs d'étoiles à détecter des débris de moins de 10 cm avec une précision de positionnement meilleure que 15 mètres pour les objets en orbite basse. La puissance de détection de son

système radar a été caractérisée par la RCS de l'objet, décrite par l'équation suivante :

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (2.1)$$

où, P_r calcule la puissance reçue par un système radar après avoir émis un signal. Ici, P_t représente la puissance transmise, qui est la force initiale du signal émis par le radar. Les gains G_t et G_r font référence aux gains de l'émetteur et du récepteur, respectivement, indiquant la capacité des antennes à concentrer ou capturer l'énergie dans des directions spécifiques. La longueur d'onde λ , mesurée en mètres, représente la distance entre les crêtes consécutives de l'onde électromagnétique, affectant directement la propagation du signal et son interaction avec la cible. La section radar σ , exprimée en mètres carrés, mesure la capacité de la cible à réfléchir les signaux radar vers le récepteur, indiquant ainsi sa détectabilité. La portée R , en mètres, désigne la distance entre le système radar et la cible, et la puissance reçue diminue de manière significative avec la quatrième puissance de cette distance.

La méthode dans [9] utilise des algorithmes de triangulation pour estimer la position des débris à partir des déplacements angulaires mesurés par plusieurs capteurs d'étoiles.

Les travaux de [10] explorent l'ablation laser. Une technique utilisant des faisceaux laser à haute énergie pour vaporiser des parties de la surface des débris, générant une poussée pour pousser les débris dans une orbite décroissante. Cette technique est avantageuse car elle ne nécessite pas de contact physique mais requiert un ciblage extrêmement précis. De plus, dans les travaux de [11], un système de harpon capture les débris spatiaux en tirant un petit projectile qui perce et s'accroche aux débris. Une fois capturés, les débris peuvent être soit tirés dans une orbite plus basse, soit désorbités directement. Cela nécessite une visée précise et des mécanismes robustes pour éviter de provoquer une fragmentation supplémentaire.

De plus, les avancées en apprentissage automatique (ML) ont ouvert de nouvelles possibilités pour automatiser la détection des débris spatiaux. Des techniques comme l'apprentissage profond peuvent aider à reconnaître des motifs dans les échos radar ou les images optiques qui indiquent la présence de débris, améliorant ainsi à la fois la précision de la détection [12] et la rapidité du traitement des données [13]. Cela est particulièrement important compte tenu de la grande quantité de données générées par les systèmes basés au sol. Un exemple notable inclut l'utilisation de l'apprentissage profond pour classer les débris en fonction de l'apprentissage des caractéristiques à partir des données radar [14].

2.2 ISAC : Détection et Communication Intégrées

ISAC représente un changement de paradigme dans la technologie sans fil, combinant les fonctions de détection et de communication à travers des ressources partagées [15], [16]. En fusionnant les fonctions de détection et de communication sur une seule plateforme, ISAC offre des avantages considérables en termes d'efficacité du spectre, de partage du matériel et d'intégration des systèmes.

2.2.1 Systemes de communications à Portée unique pour ISAC

Les systèmes de communication à porteuse unique (SC) ont été essentiels dans les technologies ISAC en raison de leur simplicité et de leur robustesse en termes de rapport de puissance crête à moyenne (PAPR) [17]. La capacité de combiner les fonctions radar et communication dans un cadre unifié réduit la redondance du matériel et la congestion spectrale. Notamment, [17] a démontré que les systèmes SC sont hautement efficaces en termes d'énergie pour l'intégration du radar et de la communication, les rendant adaptés aux applications de détection à longue portée. Des études, telles que celle de [18], examinent la flexibilité des systèmes SC pour être adaptés à des environnements à haute mobilité, comme les communications vehiculaires et les applications en orbite basse, où un faible PAPR est essentiel pour maintenir des performances fiables.

Plusieurs travaux ont exploré le potentiel des formes d'onde SC dans les cadres ISAC. [19] a réalisé une revue complète des systèmes radar et communication à double fonction, mettant en avant l'efficacité énergétique et l'utilisation spectrale des solutions ISAC basées sur SC. Leur travail souligne la capacité du SC à réduire la complexité du matériel et la congestion spectrale, ce qui le rend adapté aux applications radar-communication intégrées. De manière similaire, [20] a introduit la modulation par alignement de délai (DAM), une méthode SC novatrice qui atténue les interférences entre symboles (ISI) et améliore la résilience au Doppler, en particulier dans des scénarios de haute mobilité tels que les véhicules autonomes et les systèmes aérospatiaux.

Des avancées supplémentaires incluent le travail de [21], qui a démontré l'utilisation de signaux SC basés sur le signal de référence de démodulation 5G (DMRS) pour ISAC. Cette étude a souligné la capacité des formes d'onde SC à réaliser une détection à haute résolution tout en maintenant une communication fiable dans les réseaux de véhicules. [22] a abordé les défis de la désynchronisation des horloges dans les systèmes ISAC bistatiques, montrant comment les formes d'onde SC traitent efficacement les décalages de temps et les erreurs de fréquence porteuse dans des configurations de détection distribuée. De plus, [23] a pro-

posé une approche innovante pour améliorer les performances de distance des signaux ISAC aléatoires par la conception de façonnage d'impulsions. Leur méthode, appelée façonnage d'impulsions symboliques (SWPS), minimise les niveaux de lobes secondaires tout en respectant les critères de Nyquist. Cette technique améliore la précision de la portée et réduit l'ambiguïté. Dans [24], les auteurs ont démontré la faisabilité des systèmes ISAC basés sur SC par une preuve de concept expérimentale utilisant SDR. Leurs résultats ont révélé que les formes d'onde SC peuvent offrir des performances de communication comparables à celles des systèmes multi-porteurs comme l'OFDM tout en atteignant des résolutions de détection supérieures grâce à un façonnage de faisceau optimisé. Les auteurs de [25] ont exploré les limites de performance pour la détection passive dans les systèmes ISAC asynchrones. Leur analyse, basée sur les bornes de Cramér–Rao (CRB), a fourni des informations essentielles sur la faisabilité des formes d'onde SC pour l'estimation de l'angle d'arrivée et du Doppler dans des conditions asynchrones réelles.

Ces travaux et d'autres tels que [26–28] soulignent collectivement la polyvalence des formes d'onde SC dans les systèmes ISAC, allant de la conception innovante des formes d'onde à des validations expérimentales et des limites de performance théoriques. Ils mettent en évidence la capacité des systèmes SC à équilibrer la précision de détection et la fiabilité de communication, consolidant ainsi leur rôle en tant que pierre angulaire des avancées dans les systèmes ISAC.

2.2.2 Systèmes de communication à Multi-porteuse pour ISAC : OFDM, OTFS et défis

OFDM et OTFS ont émergé comme des candidats très prometteurs pour les systèmes ISAC. L'OFDM, largement utilisé dans les normes de communication modernes (par exemple, 4G, 5G), permet une utilisation efficace du spectre et offre une robuste résistance aux interférences. Sa capacité inhérente à multiplier les données sur plusieurs sous-porteuses en fait une solution idéale pour combiner les fonctions de communication et de détection. Les techniques multi-porteuses, en particulier l'OFDM, sont largement utilisées dans les systèmes ISAC pour leur robustesse face à l'atténuation par multipath et leur flexibilité dans la gestion du spectre [29].

Les auteurs de cette étude ont ouvert la voie à l'étude de la fusion du radar et de la communication utilisant l'OFDM, montrant comment cela peut permettre une détection à haute résolution sans sacrifier les débits de données.

OTFS, une technologie relativement plus récente, étend les capacités de l'OFDM en opérant dans le domaine délai-Doppler, ce qui est particulièrement bénéfique dans les environnements

à haute mobilité tels que les réseaux de véhicules ou les communications par satellite. OTFS transforme les signaux dans un domaine où les ressources en temps et en fréquence sont utilisées de manière efficace, offrant ainsi une plus grande résilience aux effets Doppler et à l'atténuation par multipath. Des études telles que [30] ont montré que OTFS peut surpasser l'OFDM dans des scénarios à grande vitesse, ce qui en fait un excellent candidat pour les futures applications ISAC dans des environnements dynamiques tels que les trains à grande vitesse. OTFS offre également une meilleure résolution en délai et Doppler, ce qui est essentiel pour une détection radar précise dans de telles conditions. Dans [31], d'autres explorent l'ISAC utilisant la modulation d'index (IM), en se concentrant sur la manière dont l'IM peut améliorer l'efficacité des systèmes radar et de communication conjoints. L'article explore l'application des techniques IM dans divers domaines, tels que les sous-porteuses, les antennes et les chemins spatiaux, pour encoder des informations supplémentaires. Cette approche améliore considérablement l'efficacité spectrale et énergétique tout en maintenant les performances de détection radar. Les auteurs présentent une revue complète de l'ISAC basé sur l'IM, mettant en évidence les défis tels que la conception de formes d'onde, la latence et la complexité des récepteurs, et suggèrent que l'IM offre une solution prometteuse pour les futurs systèmes ISAC haute performance, en particulier dans des configurations multi-porteuses comme l'OFDM et le FMCW (onde continue modulée en fréquence).

Dans [32], l'objectif de l'ISAC est d'intégrer les fonctions de détection et de communication en utilisant des ressources partagées telles que le spectre et le matériel, permettant une co-conception efficace pour des applications comme l'IoT, la conduite autonome et les maisons intelligentes. L'article aborde les défis clés, notamment l'optimisation de l'information mutuelle (MI) comme métrique de performance pour la détection et la communication, la gestion des exigences strictes de synchronisation dans les déploiements bistatiques et distribués, et le soutien à des applications diverses telles que la reconnaissance multi-objets multi-tâches (MOMT) et les dispositifs IoT. Il met également en évidence l'importance des méthodes de super-résolution, telles que la reconstruction de signaux clairsemés, pour améliorer la résolution de détection, tout en abordant les préoccupations liées à la sécurité et à la confidentialité. De plus, les travaux [33] ont optimisé l'allocation des ressources à travers plusieurs symboles OFDM pour améliorer la précision de détection et le débit de communication. Cependant, sa sensibilité aux effets Doppler dans des scénarios à haute mobilité limite son application dans des environnements tels que les systèmes de véhicules et de satellites. Pour pallier cette limitation, OTFS est apparu comme une alternative prometteuse, utilisant des représentations dans le domaine délai-Doppler pour garantir la robustesse face aux variations de canal induites par la mobilité. Les études de [34] ont introduit des cadres OTFS spatialement dispersés permettant une détection radar précise et une allocation efficace de la puissance dans

les domaines angulaires, tandis que [35] a utilisé l'atténuation des interférences basée sur l'apprentissage profond pour les signaux OTFS, contournant les approches traditionnelles basées sur les pilotes pour améliorer l'estimation des canaux dans des environnements variables dans le temps. Malgré ces avancées, des défis tels que la complexité du décodage, la synchronisation et l'intégration de la superposition de formes d'onde dans les deux domaines persistent, comme l'ont exploré [36]. Malgré leurs points forts, des défis demeurent, tels que la complexité de la conception du système, la synchronisation et l'adaptation de ces formes d'onde aux divers besoins ISAC. La synergie de ces formes d'onde, associée à des techniques innovantes telles que le multiplexage par division de fréquence affine (AFDM) [37], continue de faire progresser les technologies ISAC, en équilibrant l'efficacité spectrale, la robustesse et la simplicité opérationnelle.

La modulation par index (IM) a émergé comme une technologie transformative pour les systèmes ISAC, en exploitant les indices des ressources de transmission, telles que les sous-porteuses, les antennes, les chemins spatiaux ou les paramètres des formes d'onde pour encoder des informations supplémentaires et améliorer l'efficacité spectrale et énergétique [31]. Cette méthodologie est particulièrement bénéfique pour optimiser l'efficacité spectrale et énergétique tout en maintenant des performances robustes de détection et de communication.

Des études, telles que [38], soulignent l'application de la modulation par index sur les chemins spatiaux (SPIM) pour les fréquences mmWave/THz, permettant d'améliorer l'efficacité spectrale en utilisant pleinement les architectures de formation de faisceaux hybrides et en surmontant les effets de séparation des faisceaux. De plus, les systèmes IM-OFDM ont montré un potentiel significatif dans les applications ISAC. L'article [39] révèle que l'IM-OFDM peut surpasser les systèmes ISAC basés sur l'OFDM conventionnel, tant en détection qu'en communication, en abordant efficacement les défis de l'allocation de puissance des sous-porteuses. De manière similaire, [40] propose un schéma IM-OFDM superposé (S-IM-OFDM) pour améliorer les capacités de détection dans des canaux variables dans le temps tout en garantissant d'excellentes performances de communication. Les auteurs de [41] ont exploré des cadres IM massifs pour l'ISAC, en se concentrant sur la réduction de la complexité du décodage grâce à de nouveaux algorithmes, rendant ces systèmes viables pour des configurations MIMO à grande échelle. En outre, les techniques de modulation de motif de faisceau, comme discuté dans [42, 43], intègrent l'IM pour activer dynamiquement les motifs de faisceau, permettant ainsi d'améliorer l'efficacité spectrale et les compromis de performance entre les fonctions de communication et de détection. L'intégration de l'IM avec la modulation OTFS, comme proposé par [44], introduit des techniques de diffusion spatiale pour la détection radar et la communication. Cette innovation assure des performances robustes dans les domaines délai-

Doppler. Des innovations telles que les systèmes assistés par RIS et la modulation de spectre étalé par chirp décalé en fréquence IM (FSCSS-IM) intègrent la communication sécurisée avec une détection précise en utilisant des surfaces intelligentes reconfigurables et la modulation de signaux chirp [45]. Les approches ISAC centrées sur le radar, en particulier celles utilisant le radar FMCW, tirent parti de paramètres tels que la polarisation et la largeur de bande pour réaliser une détection à courte portée et une communication simultanées [46].

Dans l'ensemble, ces études soulignent la polyvalence et le potentiel transformateur de l'IM dans les systèmes ISAC. En permettant une utilisation efficace des ressources et en équilibrant les demandes de détection et de communication, l'IM est bien positionné pour jouer un rôle crucial dans l'avancement des technologies ISAC dans les réseaux sans fil de prochaine génération. Malgré ces avancées, des défis persistent pour équilibrer l'efficacité spectrale, la surcharge de calcul et l'adaptabilité dans les applications en temps réel.

2.2.3 Détection basée sur l'apprentissage machine

L'avènement des techniques d'apprentissage automatique a transformé le domaine de l'ISAC, en particulier dans le contexte de la détection radar. Les méthodes de détection basées sur l'apprentissage automatique permettent des algorithmes de traitement du signal plus sophistiqués, capables de s'adapter à des environnements complexes, rendant les systèmes radar plus précis, robustes et intelligents. Les systèmes radar traditionnels reposent sur des approches basées sur des modèles, qui peuvent rencontrer des difficultés à bien fonctionner dans des environnements imprévisibles ou hautement dynamiques. En revanche, les approches basées sur l'apprentissage automatique peuvent apprendre à partir des données et s'améliorer au fil du temps, permettant ainsi des performances supérieures dans divers scénarios.

L'article de [47] a été un précurseur dans l'application de l'apprentissage profond pour les fonctions radar et communication, améliorant considérablement la capacité du système à s'adapter à des environnements dynamiques. Ces solutions alimentées par l'IA se sont révélées essentielles pour améliorer la précision des systèmes ISAC, en particulier dans des scénarios à fort encombrement.

Les techniques d'apprentissage supervisé, telles que les réseaux neuronaux, ont été appliquées pour détecter des objets et classer des cibles dans des environnements bruyants ou encombrés. Dans [48], [49], les auteurs proposent un modèle d'apprentissage profond qui utilise les échos radar pour identifier des objets dans des environnements à forte interférence, améliorant ainsi de manière significative la précision de détection par rapport aux méthodes traditionnelles. De plus, des approches d'apprentissage non supervisé sont étudiées pour améliorer la sensibilité radar et réduire les taux de fausses alarmes. Le travail de [50] explore l'utilisation

des réseaux neuronaux profonds pour extraire des caractéristiques significatives des signaux radar, améliorant ainsi la performance de détection dans des conditions difficiles.

Les avancées récentes ont exploré des méthodes d'observation par satellite et des techniques d'apprentissage automatique pour améliorer les capacités de détection des débris [51], [52], [53]. Ces approches, incluant l'apprentissage profond [54] et l'apprentissage par renforcement [55], [56], ont montré des promesses pour améliorer la précision et l'efficacité de la détection. Cependant, elles nécessitent souvent du matériel dédié ou des ressources computationnelles substantielles, limitant ainsi leur évolutivité et leur intégration avec les systèmes satellites existants.

Les auteurs [57] introduisent une nouvelle approche ISAC exploitant les signaux THz et la décomposition polyadique canonique (CPD) pour améliorer la détection des débris spatiaux. En exploitant la rareté du canal THz et en utilisant un algorithme de moindres carrés alternés (ALS), cette approche atteint une précision de détection supérieure par rapport aux méthodes conventionnelles basées sur l'énergie (EBD), notamment dans les scénarios hors ligne de visée (NLOS). Cependant, cette approche repose sur des hypothèses spécifiques concernant la propagation des THz et pourrait rencontrer des défis liés à la variabilité du monde réel, comme la dynamique multi-orbites ou les caractéristiques hétérogènes des débris.

Un autre domaine prometteur de recherche est l'utilisation de l'apprentissage par renforcement (RL) pour l'adaptation dynamique des formes d'onde dans les systèmes ISAC [58], [59], [60], [61]. En apprenant les stratégies optimales de conception des formes d'onde à partir de l'environnement, les systèmes ISAC basés sur RL peuvent s'adapter de manière autonome à leurs tâches de détection et de communication en fonction des retours en temps réel, maximisant ainsi à la fois la précision radar et la qualité de communication. Cela représente un pas important vers des systèmes ISAC entièrement autonomes capables d'opérer dans des environnements complexes et changeants. Plusieurs études expérimentales ont été menées pour valider les modèles théoriques et les résultats de simulation des systèmes ISAC. Les expériences réelles sont essentielles pour évaluer la faisabilité pratique des systèmes ISAC et pour découvrir des défis qui pourraient ne pas être évidents dans les simulations. Par exemple, [62] présente une plateforme expérimentale complète qui intègre les fonctions radar et communication sur une architecture matérielle partagée [63]. La plateforme a été testée dans un scénario véhiculaire, démontrant que la détection radar peut être intégrée avec succès à la communication dans un seul système, fournissant un retour en temps réel pour des applications telles que la conduite autonome et l'évitement de collisions.

Dans une autre étude, [64] examine les performances des systèmes ISAC dans des environnements urbains, où les obstacles denses et les sources d'interférences posent des défis uniques.

Les résultats mettent en évidence la robustesse des solutions ISAC multiporteuses comme l’OTFS dans de tels environnements, montrant que ces systèmes peuvent gérer efficacement les réflexions multiples et les décalages Doppler tout en maintenant un débit de communication élevé. Les travaux [65] ont fourni une étude complète utilisant des bancs d’essai basés sur SDR pour démontrer la faisabilité de l’ISAC dans des applications tant véhiculaire qu’aérospatiale. De plus, l’article [66] explore l’intégration innovante des Metasurfaces de Codage Numérique Transmettant et Réfléchissant Simultanément (STAR-DCMs) dans les systèmes ISAC, mettant en lumière leur potentiel pour améliorer les fonctions de communication et de détection avec des ressources partagées. Les STAR-DCMs étendent les capacités conventionnelles des surfaces intelligentes reconfigurables en permettant une couverture complète de l’espace grâce au contrôle simultané des signaux électromagnétiques transmis et réfléchis. Les auteurs révèlent des avancées significatives dans leur conception, telles que la division d’énergie et le passage de mode, et démontrent des applications comme le suivi de véhicules, la localisation de haute précision et la détection environnementale. Malgré leur promesse, les STAR-DCMs rencontrent des défis, notamment la complexité de l’implémentation matérielle, les exigences strictes de synchronisation et le compromis inhérent entre la précision de la détection et le débit de communication.

Ces études montrent comment les systèmes ISAC peuvent s’adapter en temps réel aux interférences, offrant des performances robustes dans des environnements dynamiques. Les informations expérimentales issues de ces études ouvrent la voie à de nouveaux perfectionnements dans la conception des formes d’onde, les architectures d’antennes et les techniques avancées de traitement du signal pour l’ISAC.

2.3 Classification des systèmes radar pour ISAC et la détection de débris

Les systèmes radar utilisés pour l’ISAC et la détection de débris varient en termes de fréquence, de modulation et de paramètres opérationnels. Les radars à impulsions (PR) et les radars FMCW dominent les applications en orbite terrestre basse, offrant une haute résolution en distance. Les techniques de radar à synthèse d’ouverture (SAR) sont quant à elles essentielles pour l’imagerie à haute résolution des champs de débris [67]. Les radars Doppler et les radars à réseau phasé sont de plus en plus utilisés pour leur capacité à détecter et suivre des objets en mouvement rapide avec une grande précision.

Les avancées récentes ont exploré l’intégration des fonctions de détection et de communication au sein des systèmes radar. L’article [68] introduit une approche novatrice pour détecter et classifier les débris spatiaux en orbite terrestre basse en utilisant la technologie THz. Le système DebrisSense-THz proposé intègre des fonctionnalités de détection et de communica-

tion en exploitant les signaux THz et des techniques d'apprentissage automatique, atteignant une précision élevée de détection et de classification (95-99% à 5 THz). Les contributions clés incluent un modèle détaillé du canal THz intégrant la réflexion, la diffusion et la diffraction, ainsi que l'utilisation de machines à vecteurs de support (SVM) pour la caractérisation des débris basée sur les informations d'état du canal (CSI). Bien que le système démontre de solides performances en simulation, ses limitations incluent une dépendance à un rapport signal/bruit (SNR) élevé et des contraintes en ressources de calcul pour le traitement en temps réel à bord des satellites. Les techniques THz souffrent de limitations majeures. Elles subissent une forte atténuation atmosphérique (absorption par la vapeur d'eau, pertes en espace libre) et sont sensibles aux conditions environnementales (pluie, poussière, neige).

Les travaux de [69] proposent une forme d'onde à double fonction conçue pour relever les défis liés à la détection des débris spatiaux et à la communication inter-satellites en LEO. Cette nouvelle forme d'onde à modulation linéaire de fréquence (LFM) intègre les fonctions de radar et de communication aux fréquences THz, exploitant ses propriétés uniques pour une estimation précise de la distance et de la vitesse. Les contributions majeures incluent le développement d'impulsions LFM triangulaires et en forme de V pour atténuer le couplage distance-Doppler et garantir une détection précise des débris en mouvement, même dans des conditions NLOS (Non-Line of Sight).

L'article [70] explore les systèmes ISAC distribués, en se concentrant sur l'accès radio multi-capteurs et la coordination. Il discute de l'évolution des réseaux ISAC vers des configurations Multi-capteurs à entrées et sorties multiples (MS-MIMO), formant un réseau distribué pour la détection et la communication. Un autre travail, [71], examine l'utilisation des environnements multipaths dans les systèmes ISAC assistés par des surfaces intelligentes reconfigurables (RIS). Les résultats mettent en évidence comment la propagation multipaths peut offrir des gains de diversité spatiale pour détecter des cibles avec des signatures radar fluctuantes.

Enfin, les auteurs de [72] présentent une ontologie pour la détection et le suivi des débris spatiaux à l'aide de radars embarqués dans l'espace. L'étude aborde les défis liés à la caractérisation des trajectoires de collision potentielles pour différents types de débris et propose des solutions pour améliorer la connaissance de la situation spatiale (SSA).

Dans le tableau 2.2, les systèmes radar sont classés par type, fréquence, résolution et utilisation. La bande L (1,333 GHz) détecte les débris > 10 cm jusqu'à 1000 km pour le suivi et la surveillance, tandis que la bande Ku (16,7 GHz) identifie les débris < 1 cm dans un rayon de 500 km pour la caractérisation. La bande UHF (430–450 MHz) se spécialise dans la surveillance à longue portée, détectant les débris > 10 cm jusqu'à 2000 km. La bande X (8–12 GHz) suit et image les petits débris dans un rayon de 1000 km, et la bande S (2–4

GHz) détecte les débris > 5 cm jusqu'à 1500 km pour le suivi et la surveillance. La bande C (4-8 GHz) se concentre sur le suivi des débris de taille moyenne jusqu'à 1000 km, tandis que les radars Micro-Doppler (24/94 GHz) offrent un suivi à haute résolution.

Ces travaux fournissent des analyses approfondies sur les récents progrès des systèmes radar appliqués à l'ISAC et à la détection des débris spatiaux, mettant en évidence les défis et les solutions innovantes dans ce domaine en constante évolution.

TABLEAU 2.2 Classification des radars par type, fréquence, résolution et utilisation

Type de radar	Fréquence de fonctionnement	Résolution	Utilisation	Réf.
Bande L (Impulsion)	1,333 GHz	Détecte des débris >10 cm, jusqu'à 1000 km	Suivi / Surveillance	[73]
Bande Ku (Impulsion)	16,7 GHz	Détecte des débris <1 cm, jusqu'à 500 km	Caractérisation	[74]
Bande K (Impulsion)	18-27 GHz	Détecte des débris entre 1 et 10cm	Surveillance	[74]
UHF (Onde continue)	430-450 MHz	Détecte des débris >10 cm, jusqu'à 2000 km	Surveillance	[74]
Bande X (Impulsion)	8-12 GHz	Détecte de petits débris, jusqu'à 1000 km	Suivi / Imagerie	[75]
Bande S (Impulsion)	2-4 GHz	Détecte des débris >5 cm, jusqu'à 1500 km	Surveillance / Suivi	[76]
Bande C (Impulsion)	4-8 GHz	Détecte des débris de taille moyenne	Suivi	[76]
Micro-Doppler	24/94 GHz	Haute	Suivi	[77]

2.4 Model de pertes

Dans le domaine des communications par satellites en orbite terrestre basse, la modélisation précise des pertes de propagation est essentielle pour concevoir des systèmes efficaces. Les articles examinés abordent cette problématique sous différents angles, en intégrant des modèles adaptés aux spécificités des communications LEO.

Les auteurs [78] proposent une modulation innovante combinant l'angle d'or avec l'OFDM-IM différentiel pour les communications LEO. Ils prennent en compte les caractéristiques spécifiques des canaux LEO, notamment les effets Doppler dus à la haute mobilité des satellites. Bien que l'article se concentre sur la modulation et la détection, il intègre implicitement

un modèle de pertes qui considère les variations rapides du canal et les atténuations liées à la distance variable entre le satellite et la station au sol. Cette approche permet d'évaluer la robustesse de la modulation proposée face aux défis spécifiques des canaux LEO. Par ailleurs les études dans [79] développent un récepteur MIMO basé sur le critère MMSE pour des réseaux LEO utilisant le NOMA en liaison descendante coopérative. Le modèle de pertes considéré inclut l'atténuation due à la propagation en espace libre, les pertes liées aux conditions atmosphériques et les interférences inter-utilisateurs. Les auteurs modélisent également les fluctuations du canal causées par la mobilité des satellites et les variations de la trajectoire orbitale, ce qui est crucial pour l'optimisation du récepteur proposé. De plus l'article [80] explore l'application de la modulation spatiale (SM) et du space shift keying (SSK) dans les communications assistées par satellites LEO. Les auteurs analysent les performances de ces techniques en tenant compte des modèles de pertes spécifiques aux canaux LEO, tels que l'atténuation en espace libre, les pertes dues aux obstacles et les effets Doppler. L'étude démontre que l'intégration de la SM et du SSK peut améliorer l'efficacité spectrale et la robustesse des communications LEO, malgré les défis posés par les pertes de propagation. Les articles analysés mettent en évidence l'importance de modèles de pertes adaptés aux spécificités des communications par satellites LEO. Qu'il s'agisse de développer de nouvelles techniques de modulation ou d'optimiser les récepteurs, la prise en compte des caractéristiques uniques des canaux LEO, telles que les effets Doppler, l'atténuation en espace libre et les variations rapides du canal, est essentielle pour assurer une bonne modélisation des systèmes de communication satellitaires.

2.5 Analyse comparative de la littérature

L'analyse comparative de la littérature présenté dans le tableau 2.3 et le tableau 2.4 offre un aperçu des principales méthodologies et avancées des systèmes ISAC, en mettant en lumière leurs performances selon divers critères tels que la rapidité (capacité de la méthode à fonctionner en temps réel), la complexité (indiquant la difficulté computationnelle ou de mise en œuvre), la scalabilité (adaptabilité de l'approche à des systèmes de plus grande envergure) et la pertinence pour la détection des débris spatiaux.

Chaque approche est analysée en fonction de ses contributions, défis et applicabilité aux cadres ISAC. En synthétisant les résultats de diverses études, les tableaux visent à orienter les recherches futures en identifiant des techniques prometteuses et en abordant les limitations existantes. Cette comparaison structurée propose une feuille de route pour optimiser les systèmes ISAC dans des environnements dynamiques et contraints en ressources comme l'orbite terrestre basse (LEO), en mettant l'accent sur des solutions qui équilibrent précision

de détection, fiabilité des communications et efficacité du système.

TABLEAU 2.3 Revue comparative de la littérature.

Méthode/Approche	Principaux résultats	Défis	Pertinence	Réf.
Formes d'ondes LFM pour la communication inter-satellites	Meilleure détection en NLOS	Matériel complexe	Traite les défis Doppler	[69]
SPIM en mmWave/THz avec beamforming hybride	Amélioration de l'efficacité spectrale	Coût computationnel élevé	Efficace pour les hautes fréquences ISAC	[31]
Technologies multiporteuses (OFDM, OTFS)	Compromis en résilience Doppler	Problèmes de synchronisation	Guide le choix des formes d'onde	[81]
Radar FMCW pour détection et communication	Équilibre entre débit et détection	Évolutivité limitée.	Montre la double fonctionnalité	[46]
ISAC assisté par RIS avec modulation chirp	Communication et radar sécurisés	Déploiement complexe vs temps réel	Améliore le radar et la communication	[45]
IM-OFDM pour les défis de puissance des sous-porteuses	Surpasse l'OFDM traditionnel	Optimisation de puissance coûteuse	Utilisation efficace de la puissance	[39]
S-IM-OFDM pour des canaux dynamiques.	Meilleure détection dans des environnements dynamiques	Sensible aux erreurs Doppler	Pertinent pour les satellites LEO	[40]
Cadres expérimentaux ISAC sur SDR.	Démonstration de faisabilité	Évolutivité limitée	Valide les implémentations SDR	[24]
Cadres IM massifs pour MIMO	Applications MIMO évolutives	Besoin d'optimisation du décodage	Répond aux configurations à haute antenne	[41]
Modulation des schémas de faisceau avec IM	Équilibre des compromis	Inefficacité spectrale en présence de bruit	Optimise les performances ISAC	[42, 43]
ISAC basé sur OTFS avec diffusion spatiale	Robuste au délai-Doppler	Complexité élevée	Améliore la résilience en mobilité	[34]
Limites asynchrones ISAC via CRB.	Perspectives sur l'estimation Doppler	Validation limitée en conditions réelles	Établit des références pour ISAC	[25]
Atténuation des interférences OTFS basée sur DL	Amélioration de l'estimation de canal	Nécessite un entraînement intensif	Valide l'intégration de l'IA	[35]

TABLEAU 2.4 Résumé basé sur la performance

Méthode/Approche	Rapidité	Complexité	Évolutivité	Perspectives
Formes d'ondes LFM pour la communication inter-satellites.	Élevée	Complexe	Faible	Efficace sur environnements riches en Doppler mais exigeant pour le matériel
SPIM en mmWave/THz avec beamforming hybride.	Moyenne	Élevée	Moyenne	Améliore l'efficacité spectrale ; coûteux pour les systèmes en temps réel
Formes d'ondes multiporteuses (OFDM, OTFS)	Élevée	Moyenne	Moyenne	Polyvalentes ; problèmes de synchronisation en haute mobilité
Radar FMCW pour ISAC.	Moyenne	Faible	Moyenne	Pratique pour la double fonctionnalité, limitée en cas de débris denses
ISAC assisté par RIS avec modulation chirp.	Moyenne	Élevée	Moyenne	Assure une détection sécurisée et précise ; complexité de configuration
IM-OFDM traitant l'allocation de puissance.	Moyenne	Moyenne	Élevée	Améliore l'efficacité ; intensif sur le plan computationnel
S-IM-OFDM pour des canaux dynamiques	Élevée	Moyenne	Moyenne	Convient aux satellites LEO ; sensible aux erreurs Doppler
Cadres expérimentaux ISAC sur SDR	Moyenne	Moyenne	Faible	L'évolutivité reste un défi
Cadres IM massifs pour MIMO	Moyenne	Élevée	Élevée	Traite efficacement le décodage dans les systèmes à grande échelle
Modulation des schémas de faisceau avec IM	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Équilibre entre détection et communication ; inefficacités spectrales en présence de bruit
ISAC basé sur OTFS avec diffusion spatiale	Moyenne	Élevée	Moyenne	Résilience au délai-Doppler pour les environnements à haute mobilité
Limites asynchrones ISAC via CRB.	Moyenne	Moyenne	Faible	Validations en conditions réelles nécessaires
Atténuation des interférences OTFS basée sur DL	Élevée	Élevée	Moyenne	Traitement du signal basé sur l'IA ; entraînement intensif des données

2.6 Gaps dans la littérature

Malgré des avancées significatives dans la détection des débris et les systèmes ISAC, plusieurs domaines restent sous-explorés ou insuffisamment traités.

- **Nouvelles formes d’onde pour une détection de précision et une amélioration du BER :** Dans les systèmes ISAC, le développement de nouvelles formes d’onde, utilisant des protocoles tels qu’OTFS et Chirp Spread Spectrum (CSS), est essentiel pour améliorer la précision de détection et réduire le taux d’erreur binaire dans des scénarios de haute mobilité, comme la communication entre satellites. Les études de [82] ont montré qu’OTFS offre une meilleure résilience au Doppler que l’OFDM traditionnel, mais son plein potentiel dans les systèmes ISAC reste à exploiter. De même, des travaux sur la conception de formes d’onde innovantes, telles que le sparse OFDM et le Generalized Frequency Division Multiplexing (GFDM), ont démontré leur capacité à réduire le BER tout en améliorant la précision de détection [83].
- **Standardisation des protocoles ISAC :** Bien que de nombreux systèmes ISAC expérimentaux aient montré des résultats prometteurs, en particulier dans les communications satellitaires et véhiculaires, il manque encore des protocoles standardisés pour régir la coexistence des fonctionnalités radar et communication dans des environnements à spectre partagé. L’absence de telles normes freine le déploiement commercial des systèmes ISAC.
- **L’exploration de nouvelles formes d’ondes, combinées à des techniques de modulation spatiale comme SSK :** Les travaux actuels sur les systèmes ISAC se concentrent principalement sur des formes d’onde classiques sans exploiter pleinement les avantages des modulations spatiales comme le Spatial Shift Keying (SSK). Or, la combinaison de SSK avec des formes d’onde avancées pourrait améliorer la précision de détection tout en optimisant l’efficacité spectrale et énergétique.

CHAPITRE 3 ÉTUDE DE LA MODULATION SSK

3.1 Introduction

La modulation SSK (*Space Shift Keying*, en anglais) est une technique innovante exploitant uniquement l'activation d'antennes pour transmettre l'information, éliminant ainsi la modulation d'amplitude et de phase conventionnelle. SSK permet de simplifier l'architecture du système MIMO tout en conservant une robustesse élevée face au bruit et au fading.

3.2 Principe de transmission en SSK

Le principe fondamental de SSK repose sur l'activation d'une seule antenne à la fois pour transmettre une séquence binaire. La sélection de l'antenne active est déterminée par les bits à transmettre.

SSK encode les données en activant sélectivement une seule antenne à la fois, l'index de l'antenne active représentant les données transmises. Par exemple, considérons une séquence de bits 0010. Cette séquence est mappée de sorte que l'antenne correspondant au motif binaire soit activée, tandis que les autres restent inactives. Plus précisément, la séquence 0010 active la deuxième antenne, représentée par le vecteur $\mathbf{v} = [0, 1, 0, 0]$, où chaque position correspond à une antenne, et le '1' indique l'antenne active. Cette activation est directement liée au domaine spatial sans moduler l'amplitude ou la phase du signal, ce qui simplifie la conception de l'émetteur en éliminant le besoin de constellations complexes comme PSK ou QAM. Le signal transmis $\mathbf{x}_1$ est donc représenté par $\mathbf{x}_1 = [0, 1, 0, 0]$.

3.2.1 Modèle mathématique

Supposons que le signal reçu dans un système MIMO avec N_t antennes d'émission et N_r antennes de réception peut être exprimé comme :

$$\mathbf{y} = \sqrt{P}\mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (3.1)$$

où $\mathbf{y}$ est le vecteur de signal reçu ($N_r \times 1$), P est la puissance moyenne du signal, $\mathbf{H}$ est la matrice de canal ($N_r \times N_t$) avec des coefficients de fading Rayleigh, $\mathbf{x}$ est le vecteur de transmission, qui est un vecteur unitaire avec un seul élément égal à 1 correspondant à l'antenne active, $\mathbf{n} \sim \mathcal{CN}(0, N_0I)$ est un bruit additif gaussien.

3.2.2 Détection par Maximum de Vraisemblance (ML)

Dans un système SSK, la détection du signal repose sur l'estimation de l'antenne d'émission active. Contrairement aux modulations conventionnelles, ici, seule la position spatiale de l'antenne activée est exploitée. Le détecteur optimal suit la règle du *Maximum de Vraisemblance*, qui consiste à choisir l'antenne j maximisant la probabilité conditionnelle :

$$\hat{j} = \arg \max_{j \in \{1, \dots, N_t\}} p(\mathbf{y} | \mathbf{x}_j, \mathbf{H}) \quad (3.2)$$

La probabilité de $\mathbf{y}$ sachant $\mathbf{x}_j$ suit une loi gaussienne centrée :

$$p(\mathbf{y} | \mathbf{x}_j, \mathbf{H}) = \frac{1}{(\pi N_0)^{N_r}} \exp \left(-\frac{\|\mathbf{y} - \sqrt{P} \mathbf{h}_j\|^2}{N_0} \right) \quad (3.3)$$

En prenant le logarithme et en simplifiant, on obtient :

$$\hat{j} = \arg \max_j \Re\{\mathbf{y}^\dagger \mathbf{h}_j\} \quad (3.4)$$

où $\mathbf{h}_j$ est la j -ième colonne de la matrice de canal $\mathbf{H}$.

3.2.3 Probabilité d'erreur de détection

L'erreur de détection est dominée par la distance minimale entre les différentes colonnes de $\mathbf{H}$. La probabilité d'erreur est approximée par :

$$P_e \approx Q \left(\frac{\|\mathbf{h}_j - \mathbf{h}_k\|}{\sqrt{2N_0}} \right) \quad (3.5)$$

avec la fonction $Q(x)$ définie par :

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp \left(-\frac{t^2}{2} \right) dt \quad (3.6)$$

3.3 Analyse des performances

L'évaluation des performances d'un système basé sur SSK repose principalement sur deux critères : 1. La **probabilité d'erreur binaire**, qui mesure la fiabilité du système en fonction du rapport signal sur bruit. 2. L'**ordre de diversité**, qui détermine la robustesse du système face aux variations du canal.

3.3.1 Probabilité d'erreur binaire

La probabilité d'erreur en SSK dépend de la capacité du récepteur à distinguer correctement l'antenne d'émission activée. Cette distinction est influencée par les variations du canal et le bruit thermique du récepteur.

Approximation de la probabilité d'erreur : Sous l'hypothèse d'un canal de Rayleigh avec fading indépendant sur chaque antenne d'émission, la probabilité d'erreur est dominée par la séparation minimale entre les colonnes de la matrice de canal $\mathbf{H}$.

La probabilité d'erreur conditionnelle (PEP – *Pairwise Error Probability*) entre deux antennes j et k est donnée par :

$$P(j \rightarrow k) = Q\left(\frac{\|\mathbf{h}_j - \mathbf{h}_k\|}{\sqrt{2N_0}}\right) \quad (3.7)$$

où : - $Q(x)$ est la fonction Q de Gauss définie comme :

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad (3.8)$$

et $\|\mathbf{h}_j - \mathbf{h}_k\|$ représente la distance euclidienne entre les colonnes de la matrice de canal.

Approximation globale du taux d'erreur binaire : Sous l'hypothèse d'un grand nombre d'antennes de réception (N_r), la probabilité moyenne d'erreur binaire peut être approximée par :

$$P_b \approx \frac{1}{N_t - 1} \sum_{j \neq k} Q\left(\sqrt{\frac{\gamma}{2}} \|\mathbf{h}_j - \mathbf{h}_k\|^2\right) \quad (3.9)$$

où γ représente le SNR moyen par antenne de réception :

$$\gamma = \frac{E_b}{N_0} \quad (3.10)$$

En pratique, cette équation montre que le taux d'erreur binaire diminue exponentiellement avec l'augmentation de la diversité spatiale, notamment grâce à l'augmentation de N_r .

3.3.2 Ordre de diversité

L'ordre de diversité d d'un système de communication mesure la rapidité avec laquelle la probabilité d'erreur décroît lorsque le SNR augmente.

Pour un système SSK avec N_r antennes de réception, l'ordre de diversité est donné par :

$$d = N_r \quad (3.11)$$

Cela signifie que le taux d'erreur en SSK décroît proportionnellement à $1/\gamma^{N_r}$.

Interprétation physique Un ordre de diversité plus élevé signifie que le système est plus résilient aux variations du canal. En SSK, la diversité spatiale est obtenue grâce à la distinction des colonnes de la matrice $\mathbf{H}$. Lorsque N_r augmente : - Le système devient plus robuste contre le fading. - La détection devient plus fiable, réduisant ainsi le taux d'erreur.

Comparaison avec d'autres techniques Comparé aux schémas classiques MIMO utilisant la modulation d'amplitude et de phase (APM), SSK offre des performances comparables tout en maintenant une complexité réduite, grâce à l'élimination des transceivers RF complexes.

3.3.3 Impact des paramètres du système sur la performance

La performance du système SSK est influencée par plusieurs paramètres :

- **Nombre d'antennes d'émission (N_t)** : Plus N_t est élevé, plus le taux d'erreur binaire diminue légèrement. Une augmentation de N_t renforce la diversité spatiale et peut indirectement contribuer à une meilleure robustesse du système. Cependant, en comparaison avec les techniques de Spatial Modulation (SM), comme illustré à la Fig. 3.3, la modulation SSK affiche une efficacité spectrale inférieure. Néanmoins, elle compense cette limitation par une consommation d'énergie réduite et une simplicité de mise en œuvre par rapport aux autres techniques. Cette simplicité se traduit par une complexité de détection plus faible, ce qui améliore sa probabilité de détection de l'antenne active à la réception, par rapport à d'autres techniques de modulation, rendant SSK particulièrement adapté aux scénarios nécessitant une faible consommation énergétique et une haute fiabilité. En outre l'utilisation de GSSK, qui se traduit par l'activation d'au moins deux antennes à l'émission, offre une amélioration considérable de l'efficacité spectrale par rapport aux autres techniques comme décrit à la Fig. 3.3 .

- **Rapport Signal/Bruit (γ)** : Un SNR plus élevé améliore la capacité du récepteur à détecter l'antenne émettrice active, réduisant ainsi les erreurs.
- **Corrélation entre les antennes** : Si les antennes sont fortement corrélées (ex. faible séparation physique), les performances se dégradent en raison de la difficulté à distinguer les chemins de propagation.
- **Type de canal** : Un canal de Rayleigh avec fading sévère réduit les performances, tandis qu'un canal de Rician (avec ligne de vue dominante) ou de Nakagami peuvent améliorer la distinction entre antennes, comme illustré dans les Fig. 3.1 et Fig. 3.2.

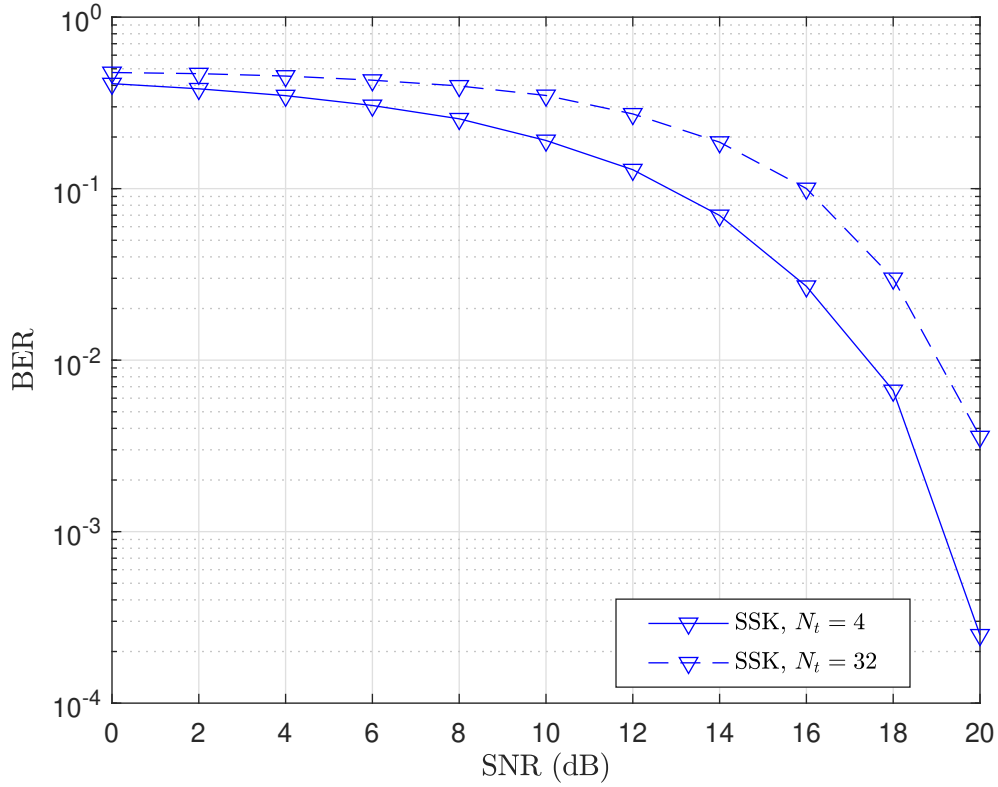


FIGURE 3.1 Taux d'erreur binaire pour $N_t = 4$ et 32, avec $\mu = \omega = 2$, canal de Nakagami.

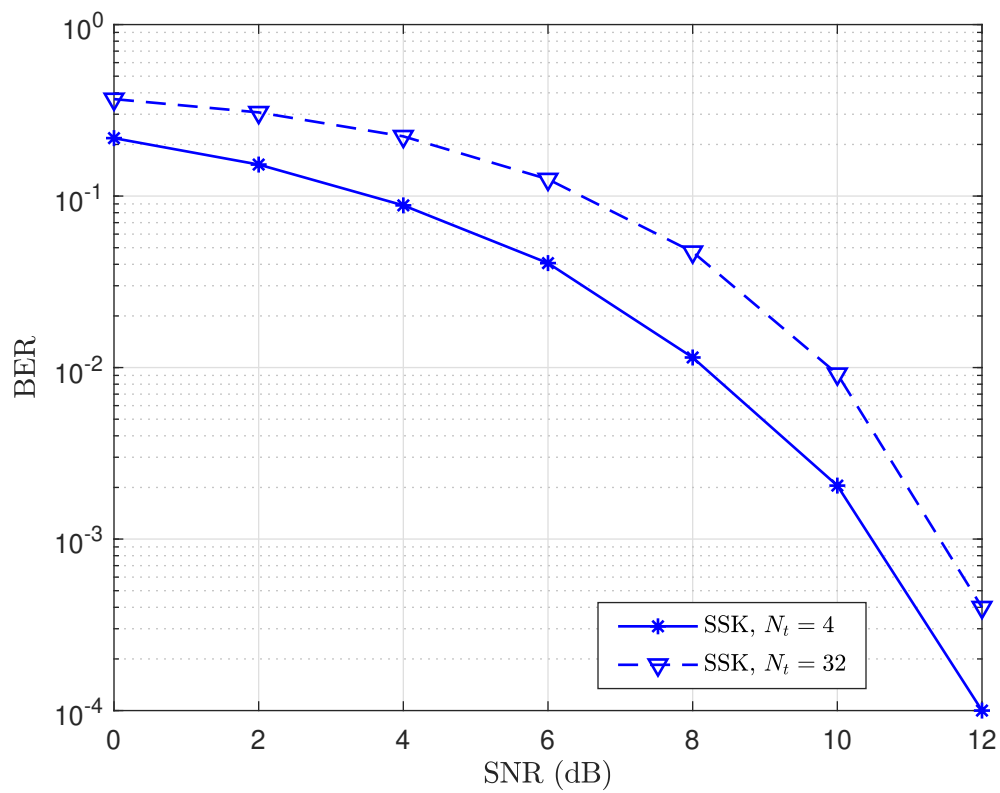


FIGURE 3.2 Taux d'erreur binaire pour $N_t = 4$ et 32, canal de Rayleigh

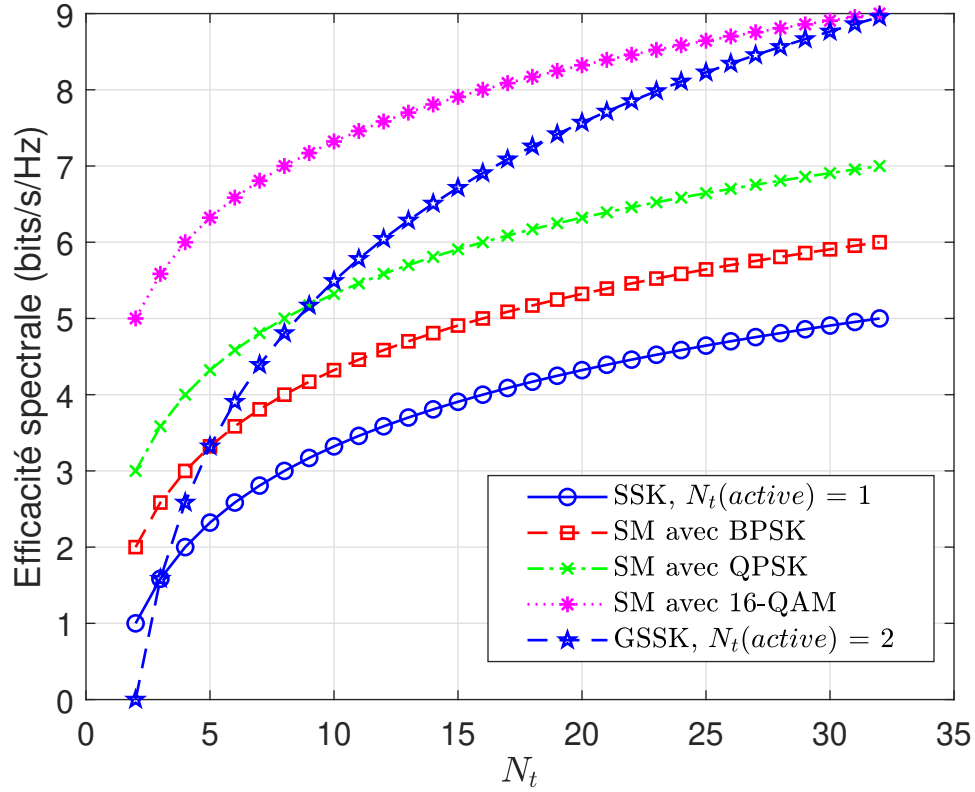


FIGURE 3.3 Comparaison de l'efficacité spectrale entre SSK, GSSK et les techniques SM

3.3.4 Comparaison avec d'autres modulations MIMO

La modulation SSK se distingue des autres techniques MIMO par plusieurs aspects :

TABLEAU 3.1 Comparaison des techniques de modulation MIMO.

Modulation	Complexité	Débit binaire	Robustesse au bruit
SSK	Faible	Modéré	Élevée
SM (Spatial Modulation)	Moyenne	Élevé	Moyenne
V-BLAST	Élevée	Très élevé	Faible
OSTBC (Alamouti)	Moyenne	Faible	Très élevée

3.4 Conclusion

La modulation SSK représente une alternative efficace pour les systèmes MIMO à faible complexité. Son architecture simplifiée permet une réduction du coût matériel tout en offrant une

performance comparable aux modulations classiques, en particulier dans des environnements de propagation difficiles.

L'analyse des performances montre que la modulation SSK est une alternative viable aux techniques MIMO classiques, car elle présente les avantages suivants :

- Faible complexité grâce à l'élimination des circuits RF complexes.
- Robustesse aux interférences et au bruit, avec un ordre de diversité élevé.
- Performance améliorée dans des environnements avec fading multipath.

Cependant, ses limites incluent un débit binaire inférieur comparé aux techniques à multiplexage spatial comme V-BLAST. Pour compenser cette limitation, des variantes telles que Generalized SSK (GSSK) permettent d'activer plusieurs antennes simultanément pour augmenter le débit ou encore, des techniques adaptatives telles que la sélection dynamique d'antennes et le design de symboles pour améliorer les performances en fonction des conditions du canal.

CHAPITRE 4 APPLICATION DE LA MODULATION SSK POUR LA COMMUNICATION ET LA DÉTECTION

Les systèmes ISAC offrent un cadre à double fonctionnalité pour la détection des débris et une communication fiable. Les études dans cette partie se concentrent sur une analyse comparative des formes d'onde modulées en fréquence linéaire (LFM) et des formes d'onde sinusoïdales standards afin d'améliorer la précision de détection de la portée et de la vitesse des débris, tout en maintenant des performances de communication robustes dans le système ISAC.

En exploitant des techniques de modulation avancées telles que le SSK, nous examinons le compromis entre la performance du système et sa complexité. Nos résultats indiquent qu'avec le SSK, les formes d'onde en chirp et sinusoïdales atteignent des performances en termes de taux d'erreur binaire pratiquement identiques. Cependant, la forme d'onde en chirp dépasse la forme d'onde sinusoïdale en précision de détection, tandis que la forme sinusoïdale offre des avantages en termes de simplicité de conception radar.

Cela procure une plus grande flexibilité dans le choix des types de formes d'onde au sein des systèmes ISAC, permettant des conceptions adaptées pour atteindre des objectifs de performance spécifiques. Ces observations jettent les bases de solutions ISAC évolutives pour faire face aux risques croissants posés par les débris orbitaux.

4.1 Description du système

Les signaux radar LFM (modulation de fréquence linéaire) sont essentiels dans les systèmes ISAC conçus pour les satellites LEO. Bien que les radars à impulsions soient efficaces pour la mesure de la portée, leur incapacité à transmettre et recevoir simultanément crée des points morts [84], ce qui les rend inadaptés à la détection des débris proches. En revanche, les radars à onde continue modulée en fréquence (FMCW) transmettent des signaux en chirp continus, éliminant les points morts mais manquent de diversité de formes d'onde nécessaire pour une communication robuste.

Le système ISAC proposé comble ces limitations en adoptant une configuration FMCW avec des durées d'impulsions ajustées pour s'assurer que les échos sont reçus pendant la période de l'impulsion. De plus, il intègre des formes d'onde sinusoïdales standard, ainsi que la modulation et la démodulation SSK pour améliorer la communication. Ce cadre à double fonction intègre des capacités de détection radar et de communication, offrant une solution

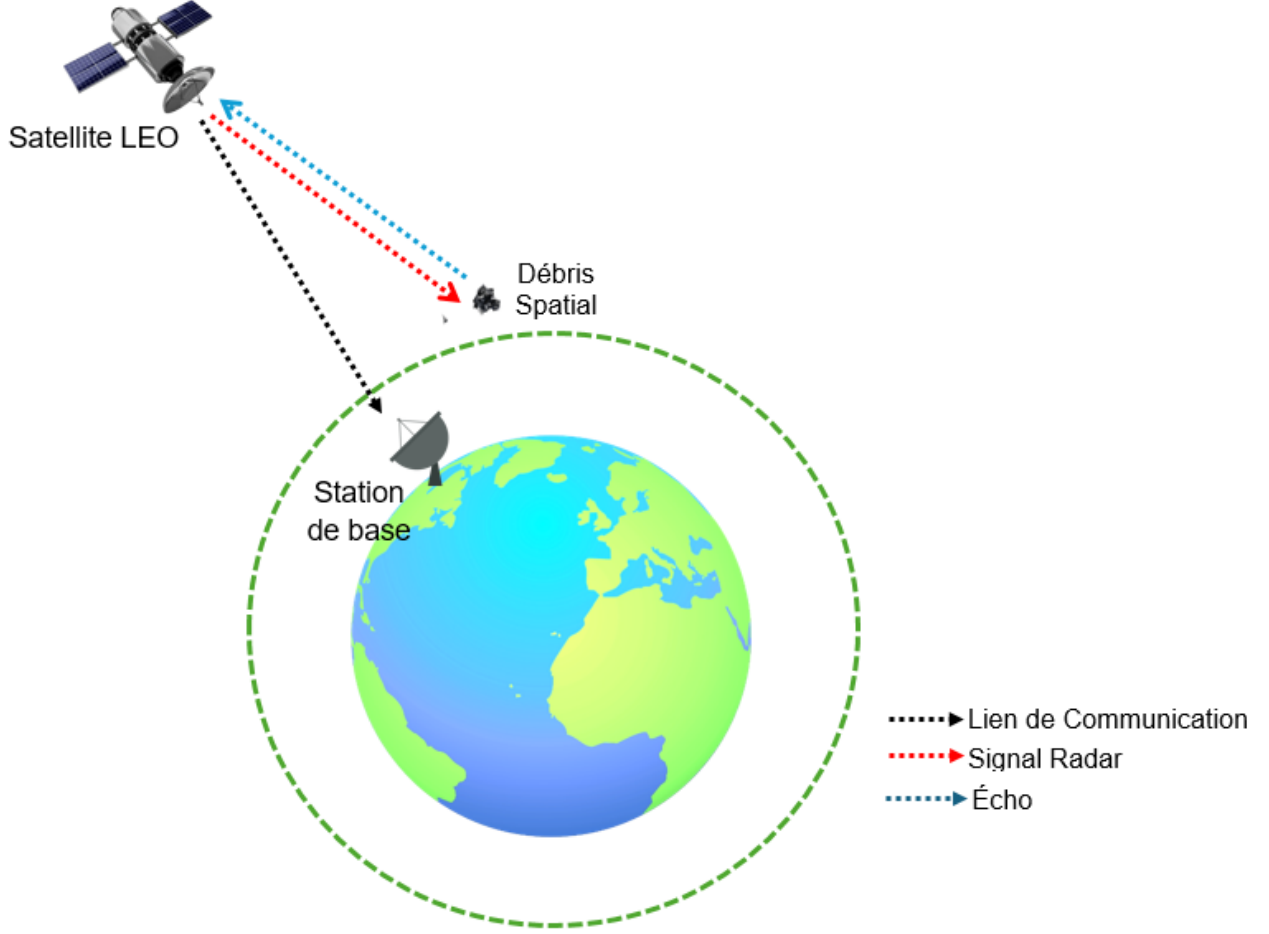


FIGURE 4.1 Modèle du système proposé pour la détection et la communication.

rentable et évolutive pour les réseaux de satellites LEO. L'architecture générale du système proposé est illustrée dans la Fig. 4.1. Nous fournissons ci-dessous une description détaillée des composants du modèle du système.

4.1.1 Émetteur

L'émetteur du satellite LEO, comme illustré dans la Fig. 4.2, est équipé de N_t antennes d'émission et transmet un signal en chirp ou sinusoïdal continu à travers le canal. Nous assumons que la distance entre les N_t antennes est suffisamment grande pour avoir des canaux non corrélés. L'émetteur dans ce système remplit une double fonction : la communication de données et la détection radar. Comme montré dans la Fig. 4.2, il commence par un flux binaire, qui est mappé sur des antennes d'émission spécifiques à l'aide du mappage SSK. La sélection des antennes garantit une transmission spatiale efficace de l'information. Simultanément, un générateur de formes d'onde produit soit des signaux en chirp, couramment utilisés pour la

détection radar en raison de leurs capacités d'estimation de la portée et de la vitesse, soit des signaux sinusoïdaux pour des besoins de communication plus simples. L'antenne sélectionnée dans l'array transmet la forme d'onde générée, qui porte non seulement les données encodées, mais permet également la fonctionnalité radar en réfléchissant les objets dans l'environnement pour les applications de détection. Ce design d'émetteur intègre efficacement la modulation spatiale avec la génération de formes d'onde radar, permettant ainsi la communication et la détection de l'environnement dans un cadre unique.

4.1.2 Récepteur

Basé sur notre modèle de système représenté dans la Fig. 4.1, il existe deux systèmes récepteurs : Le satellite LEO co-localisé qui reçoit et traite le signal radar réfléchi par les débris, et la station de base au sol (GS) qui détecte les données de communications transmises.

Récepteur radar du satellite LEO

Le récepteur radar du satellite LEO et l'émetteur sont co-localisés, comme le montre la Fig. 4.2. Le système récepteur radar est soigneusement conçu pour traiter les signaux d'écho entrants réfléchis par les débris, facilitant ainsi l'extraction des métriques de détection radar. Pour les signaux en chirp, le processus de déchirpage, un élément clé du système, consiste à mélanger le signal reçu avec un chirp de référence. Cette opération réduit efficacement la largeur de bande de la fréquence intermédiaire, facilitant ainsi la conversion analogique-numérique à faible vitesse et optimisant le traitement du signal. Cette étape est cruciale pour garantir la capacité du système à gérer les signaux haute fréquence tout en minimisant les exigences matérielles. Pour améliorer la précision de la détection, notamment dans des environnements à faible SNR, l'algorithme Root-MUSIC et la FFT sont utilisés pour extraire la fréquence de battement (la différence entre la fréquence du signal de référence et la fréquence du signal reçu). Ces algorithmes avancés permettent une estimation précise de la fréquence de battement, améliorant considérablement la capacité du récepteur à détecter et interpréter les signaux avec précision.

Récepteur de la station au sol (GS)

Le récepteur de la station au sol (GS), équipé de N_r antennes réceptrices comme indiqué dans la Fig. 4.2, est conçu pour détecter les données transmises via les indices des antennes d'émission activées. Il peut recevoir des données sur la détection des débris spatiaux provenant du satellite émetteur en LEO, fournissant des informations essentielles pour l'évitement des

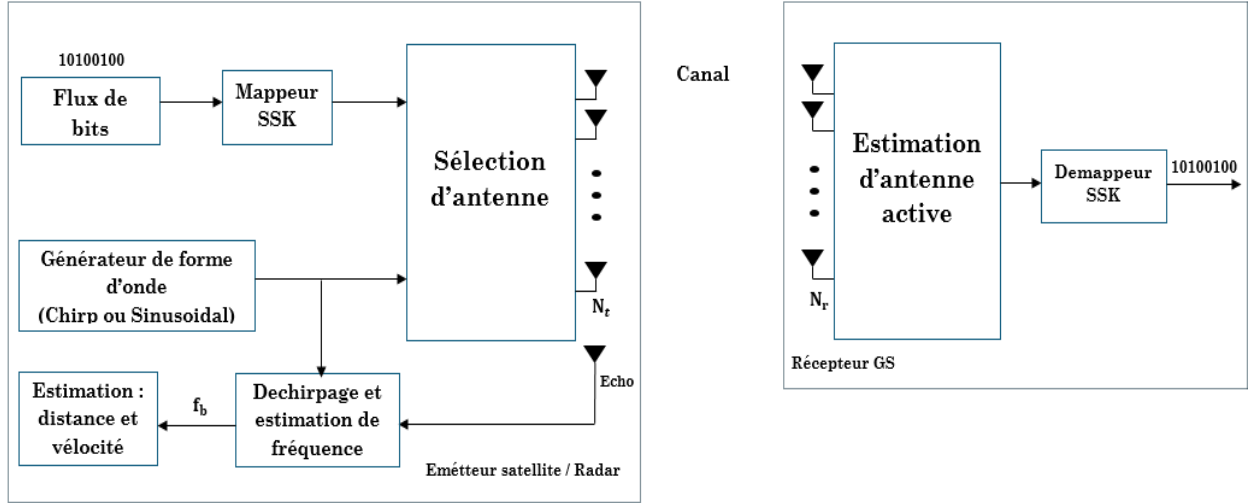


FIGURE 4.2 Bloc diagramme de l'émetteur et du récepteur

collisions et la gestion du trafic spatial. La tâche principale du récepteur est l'estimation de l'antenne active, qui consiste à identifier l'antenne d'émission spécifique activée sur le satellite émetteur à l'aide du détecteur de vraisemblance maximale (ML). Cette étape est cruciale pour démoduler les données codées en utilisant SSK, car l'information est encodée dans le domaine spatial sous forme d'indices d'antennes. Une fois l'antenne active identifiée, le démappage SSK reconstruit le flux de bits original. Le design du récepteur avec N_r antennes permet une détection et un décodage précis des données transmises, garantissant une communication fiable tout en complétant les capacités de détection radar intégrées dans le système.

4.2 Analyse de la Communication et de la Détection des Débris

4.2.1 Analyse du lien de communication basé sur SSK

Dans ce qui suit, nous discutons et analysons les composants du lien de communication entre le satellite LEO émetteur et la station au sol réceptrice.

Processus de codage

SSK est une technique de modulation spatiale qui exploite de manière unique le domaine spatial dans les systèmes MIMO (Multiple Input Multiple Output) en encodant l'information dans les indices des antennes d'émission actives. Contrairement aux schémas de modulation traditionnels qui varient les propriétés du signal telles que l'amplitude, la phase ou la fréquence, SSK encode les données en activant sélectivement une seule antenne à la fois, l'indice

de l'antenne active représentant les données transmises. Cette activation est directement liée au domaine spatial sans moduler l'amplitude ou la phase du signal, ce qui simplifie la conception de l'émetteur en éliminant le besoin de constellations complexes comme la modulation par décalage de phase (PSK) ou la modulation d'amplitude en quadrature (QAM). Dans notre système SSK à N_t antennes, une séquence binaire $\mathbf{b} \in \{0, 1\}^{\log_2(N_t)}$ est mappée de manière unique à un indice d'antenne active. Le vecteur de signal transmis $\mathbf{v}(t)$ est donné par $\mathbf{v}(t) = \mathbf{e}_k x(t)$, où $\mathbf{e}_k$ est la k -ème colonne de la matrice d'identité $\mathbf{I}_{N_t} \in \mathbb{R}^{N_t \times N_t}$, et $x(t)$ est la forme d'onde transmise (par exemple, chirp ou sinusoidale).

Formes d'onde transmises

Les formes d'onde chirp et sinusoidales sont intégrées dans nos systèmes basés sur SSK, servant à des fins distinctes dans l'encodage des données et assurant des capacités de détection robustes.

Les formes d'onde basées sur le chirp, connues pour leur variation linéaire de fréquence au cours du temps, peuvent être classées en chirp montant ou chirp descendant [69]. Dans un chirp montant, la fréquence augmente linéairement et peut être représentée par

$$x_{\text{up}}(t) = A \cos \left(2\pi f_0 t + \frac{\mu}{2} t^2 \right), \quad (4.1)$$

où f_0 est la fréquence centrale, A est l'amplitude, et $\mu = \frac{\Delta F}{T}$ définit le taux de chirp basé sur la largeur de bande ΔF et la durée de l'impulsion T . À l'inverse, un chirp descendant présente une fréquence décroissante linéairement, exprimée par

$$x_{\text{down}}(t) = A \cos \left(2\pi f_0 t - \frac{\mu}{2} t^2 \right). \quad (4.2)$$

En alternant entre des signaux de chirp montant et descendant au sein d'une seule impulsion, ces formes d'onde atténuent les effets du couplage gamme-Doppler, permettant une estimation précise de la portée et de la vitesse pour une détection efficace des débris. Ce codage simple mais efficace garantit une performance de communication constante tout en complétant les formes d'onde chirp dans les systèmes ISAC. L'algorithme 1 décrit la fonction utilisée pour générer les formes d'onde de chirp montant et descendant.

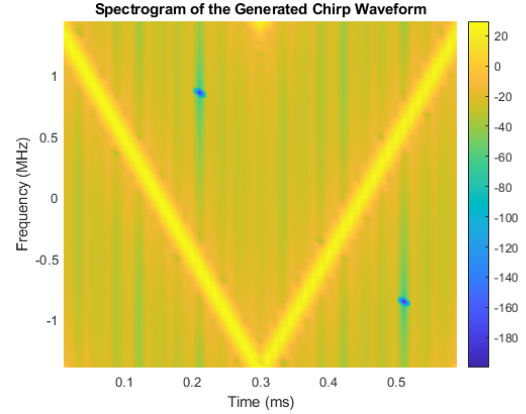
Algorithm 1 Générateur de Chirp

Require: $\Delta F, T, f_s, bit$
Ensure: *waveform*

- 1: $t \leftarrow 0 : 1/f_s : T - 1/f_s$
 - 2: $x_{up} \leftarrow chirp(t, \Delta F/2, T, -\Delta F/2, 'linear') + ichirp(t, \Delta F/2, T, -\Delta F/2, 'linear', 90)$
 - 3: $x_{down} \leftarrow chirp(t, -\Delta F/2, T, \Delta F/2, 'linear') + ichirp(t, -\Delta F/2, T, \Delta F/2, 'linear', 90)$
 - 4: $waveform \leftarrow [x_{up}, x_{down}]$
 - 5: **return** *waveform*
-



(a) Forme d'onde montante



(b) Forme d'onde descendante

FIGURE 4.3 Spectrogramme des formes d'ondes chirp montante et descendante

La figure 4.3 ci-dessus représente le spectrogramme de la forme d'onde montante et descendante. L'échelle de couleur représente l'amplitude du signal en fonction du temps et de la fréquence. Les points bleus correspondent à des zones de très faible intensité. Ils peuvent être causés par des interférences, des effets de filtrage ou des artefacts numériques dans l'analyse.

Pour montrer la robustesse des formes d'onde chirp, nous comparons la performance du système utilisant des formes d'onde chirp avec celle utilisant une forme d'onde sinusoïdale. Pour le signal sinusoïdal, la forme d'onde transmise est exprimée comme $x_{sin}(t) = A \sin(2\pi ft)$.

Les antennes activées transmettent la même forme d'onde $x(t)$ qui peut être une forme d'onde chirpée ou sinusoïdale, telle que

$$x(t) = \begin{cases} x_{chirp}(t), & \text{pour une forme d'onde chirpée} \\ x_{sin}(t), & \text{pour une forme d'onde sinusoïdale,} \end{cases} \quad (4.3)$$

où $x_{chirp}(t) = x_{up}(t)x_{down}(t)$.

Modèle de canal

Le lien de communication peut être divisé en perte de trajet et composants de fading à petite échelle [78]. Premièrement, la perte de trajet, PL_{sg} , incluant les effets à grande échelle, est exprimée comme

$$PL_{sg} = L_b + L_g + L_s, \quad (4.4)$$

où L_b , L_g et L_s représentent respectivement la perte de trajet de base, l'atténuation due aux gaz atmosphériques et l'atténuation due à la scintillation ionosphérique ou troposphérique. La perte de trajet de base en dB est modélisée comme

$$L_b = \text{FSPL}(d, f_c) + \text{SF} + \text{CL}(\theta_E, f_c), \quad (4.5)$$

où FSPL est la perte de trajet dans l'espace libre, SF désigne l'ombrage avec une distribution gaussienne telle que $\text{SF} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{\text{SF}}^2)$, et CL est la perte par encombrement. La perte de trajet dans l'espace libre est calculée comme

$$\text{FSPL}(d, f_c) = 32.45 + 20 \log_{10}(f_c) + 20 \log_{10}(d), 1001 [80] \quad (4.6)$$

avec d étant la distance en biais en mètres, f_c étant la fréquence porteuse en GHz, et θ_E étant l'angle d'élévation entre la station au sol (GS) et le satellite LEO transmetteur. La distance en biais d est déterminée par l'altitude du satellite h_0 et θ_E comme

$$d = \sqrt{R_E^2 \sin^2(\theta_E) + h_0^2 + 2h_0 R_E - R_E \sin(\theta_E)}, \quad (4.7)$$

où R_E , le rayon de la Terre, est d'environ 6 371 km [80]. L'atténuation due aux gaz atmosphériques, dépendante de la fréquence, de l'angle d'élévation, de l'altitude et de la densité de vapeur d'eau, est donnée par

$$L_g = \frac{A_{\text{zenith}}(f_c)}{\sin(\theta_E)}, \quad (4.8)$$

où A_{zenith} représente l'atténuation du zénith pour les fréquences comprises entre 1 et 1000 GHz. La perte par scintillation L_s provient des effets ionosphériques ou troposphériques, pertinents pour les fréquences inférieures à 6 GHz (ionosphérique) et supérieures à 6 GHz (troposphérique). L'atténuation due à la pluie et aux nuages est également prise en compte pour les fréquences supérieures à 6 GHz, mais elle est négligeable sous l'hypothèse de ciel dégagé utilisée ici.

Deuxièmement, le canal à petite échelle est modélisé comme un canal de fading de type Rician ombragé avec des composants à ligne de visée (LoS) et non-ligne de visée (NLoS). Nous

définissons $\mathbf{H}_{sg} \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$ comme la matrice de canal entre le satellite LEO transmetteur et la station au sol (GS). Le coefficient de fading Rician ombragé entre l'antenne de transmission i -ème et l'antenne de réception l -ème est donné par

$$h_{sg(i,l)} = \sqrt{\frac{K}{K+1}} |h_{sg(i,l)}^{\text{LoS}}| + \sqrt{\frac{1}{K+1}} |h_{sg(i,l)}^{\text{NLoS}}|, \quad (4.9)$$

où K est le facteur Rician. Ainsi, le canal entre le satellite LEO transmetteur et la station au sol (GS) est $\mathbf{H}_{sg} = \{h_{sg(i,l)}\}_{i=1, l=1}^{N_t, N_r}$. Les composants LoS et NLoS de $h_{sg(i,l)}$, c'est-à-dire $h_{sg(i,l)}^{\text{LoS}}$ et $h_{sg(i,l)}^{\text{NLoS}}$, sont donnés comme suit

$$|h_{sg(i,l)}^{\text{LoS}}| \sim \text{Nakagami}(m, \Omega), \quad \angle h_{sg(i,l)}^{\text{LoS}} \sim \text{Unif}[0, 2\pi),$$

$$|h_{i,l}^{\text{NLoS}}| \sim \text{Rayleigh}(\sigma_R), \quad \angle h_{i,l}^{\text{NLoS}} \sim \text{Unif}[0, 2\pi),$$

où m et Ω sont les paramètres de forme et d'étalement pour la distribution de Nakagami, et σ_R est lié à l'amplitude moyenne du composant NLoS. Troisièmement, le décalage Doppler $f_{d,sg}$ dans le lien descendant entre le satellite et la station au sol (GS) peut être donné par

$$f_{d,sg} = \left(\frac{v}{c}\right) \left(\frac{R_E}{R_E + h_0} \cos \theta_E\right) f_c, \quad (4.10)$$

où c est la vitesse de la lumière et v est la vitesse relative entre le satellite LEO transmetteur et la station au sol (GS). Pour une distance d entre le satellite et la station au sol (GS), nous pouvons obtenir le délai τ comme $\tau = \frac{d}{c}$. En tenant compte du décalage Doppler, la réponse du canal entre l'antenne de transmission i -ème et l'antenne de réception l -ème peut être obtenue comme

$$h_{sg(i,l)}(t) = h_{i,l} e^{-j2\pi f_c \tau t} \delta(\tau - \tau_t), \quad (4.11)$$

où τ_t représente le délai au t -ème créneau horaire.

Détection à la station au sol (GS)

Après avoir obtenu les configurations du système et les modèles de canal, l'expression des signaux reçus peut être donnée par

$$\mathbf{y}_{sg} = \sqrt{E_s PL_{sg}} \mathbf{H}_{sg} \mathbf{v} + \mathbf{n}, \quad (4.12)$$

où PL_{sg} représente les pertes de trajet du satellite à la station de base au sol, $\mathbf{n} \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}$ représente le vecteur de bruit blanc gaussien avec $\mathbf{n} = \{n_l\}_{l=1}^{N_r}$, n_l étant le bruit blanc gaussien

de moyenne nulle et de variance N_0 , et E_s étant l'énergie du symbole, exprimée par

$$E_s = \frac{1}{N_t} \sum_{k=1}^{N_t} |\mathbf{v}_k|^2. \quad (4.13)$$

Par conséquent, le SNR instantané à l'antenne de réception l -ème peut être obtenu comme

$$\gamma_{sg,l} = \frac{|\sqrt{E_s P L_{sg}} h_{sg,l}^v + n_l|^2}{N_0}, \quad (4.14)$$

où nous définissons $\mathbf{H}_{sg}\mathbf{v} = \{h_{sg,l}^v\}_{l=1}^{N_r}$. De plus, en tenant compte de l'exactitude dans la détection des signaux, un schéma de pondération adaptatif est utilisé. Le signal reçu $\mathbf{y}_{sg}(t)$ est pondéré en fonction de la puissance reçue P_r

$$\mathbf{y}_{sg(w)}(t) = \mathbf{W} \cdot \mathbf{y}_{sg}(t), \quad (4.15)$$

où $\mathbf{W} = \text{diag}(w_1, w_2, \dots, w_{N_r})$ et $w_i = P_r(i)/\max(P_r)$. Cette pondération met l'accent sur les signaux plus forts tout en supprimant les composants dominés par le bruit. Ensuite, le détecteur ML est appliqué dans nos schémas SSK, en minimisant la distance euclidienne entre le signal reçu et tous les signaux transmis possibles, ce qui peut être exprimé comme suit

$$\{\hat{\mathbf{v}}\} = \arg \min_{\mathbf{v}} \left\| \mathbf{y}_{sg(w)} - \sqrt{E_s P L_{sg}} \mathbf{H}_{sg} \mathbf{v} \right\|^2, \quad (4.16)$$

où $\hat{\mathbf{v}}$ représente l'estimation de $\mathbf{v}$. Après le traitement du détecteur ML, nous pouvons facilement démoduler et décoder les résultats détectés, et obtenir les séquences de bits transmises. La stratégie de détection ML, combinée à la pondération adaptative, garantit une performance fiable même dans des conditions de canal difficiles.

Impact de l'estimation imparfaite du CSI

Dans le scénario pratique des satellites, en raison de l'environnement sans fil complexe, l'estimation de l'information sur l'état du canal (CSI) au récepteur ne peut être parfaite. En tenant compte de l'estimation imparfaite du CSI au récepteur et en se référant au modèle d'estimation imparfaite du CSI de [85], le coefficient de $h_{sg(i,l)}^v$ peut être exprimé comme la somme de $\dot{h}_{sg(i,l)}^v \sim \mathcal{CN}(0, 1 - \delta_{e1}^2)$ et $\ddot{h}_{sg(i,l)}^v \sim \mathcal{CN}(0, \delta_{e1}^2)$. Étant donné que δ_{e2}^2 désigne l'inexactitude de l'estimation du CSI avec $\ddot{\delta}_{e2}^2 = 1 - \delta_{e2}^2$. Ainsi, nous pouvons obtenir les signaux reçus à l'antenne de réception l -ème pour nos schémas SSK avec estimation imparfaite du CSI comme

$$\ddot{y}_{SSK,l} = \sqrt{E_s P L_{sg}} \left(\delta_{e2}^2 \ddot{h}_{sg(i,l)}^v + \ddot{\delta}_{e2}^2 \dot{h}_{sg(i,l)}^v \right) + n_l, \quad (4.17)$$

où $\mathbf{n} \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}$ représente le vecteur de bruit blanc gaussien avec $\mathbf{n} = \{n_l\}_{l=1}^{N_r}$, n_l étant le bruit blanc gaussien de moyenne nulle et de variance N_0 .

Métriques de performance du BER

Les métriques de performance dans les systèmes basés sur SSK pour la communication incluent le BER, qui quantifie la probabilité d'erreurs dans les données transmises. Le BER est défini mathématiquement par

$$P_b = \frac{1}{N_t} \sum_{k=1}^{N_t} Q \left(\sqrt{\frac{\gamma_{sg,l}}{N_t}} \right), \quad (4.18)$$

où N_t représente le nombre d'antennes de transmission, $Q(\cdot)$ désigne la fonction Q de Gaussienne, et $\gamma_{\text{LEO-GS},l}$ est le SNR instantané par bit à l'antenne GS, comme décrit dans l'équation 4.14. Cette formule capture la performance en moyennant la probabilité d'erreur à travers toutes les activations possibles des antennes, offrant un aperçu de la fiabilité du système sous différentes conditions de canal.

En tirant parti de la modulation et démodulation SSK, le système offre une grande efficacité spectrale, une consommation d'énergie réduite, et une robustesse contre les interférences et les effets Doppler.

Performance du BER

La probabilité d'erreur conditionnelle (EP) entre le symbole transmis $\mathbf{v}$ et les ensembles de signaux détectés $\hat{\mathbf{v}}$ peut être donnée comme [86]

$$\begin{aligned} \text{EP}(\{v\} \rightarrow \{\hat{v}\} \mid \{H_{sg}\}) &= \Pr \left(\left\| \mathbf{y}_{sg(w)} - \sqrt{E_s P L_{sg}} \mathbf{H}_{sg} \mathbf{v} \right\|^2 \right. \\ &\quad \left. > \left\| \mathbf{y}_{sg(w)} - \sqrt{E_s P L_{sg}} \mathbf{H}_{sg} \hat{\mathbf{v}} \right\|^2 \right). \end{aligned} \quad (4.19)$$

Après avoir résolu l'équation 4.19 comme le fait [87], l'EP conditionnelle peut être obtenue comme suit

$$\text{EP}_{\{v\} \rightarrow \{\hat{v}\}} = \mathbb{E} \left[Q \left(\sqrt{\frac{E_s P L_{sg}}{2}} \left\| \mathbf{H}_{sg} (\mathbf{v} - \hat{\mathbf{v}}) \right\| \right) \right], \quad (4.20)$$

où $\mathbb{E}[\cdot]$ est l'espérance et $Q(\cdot)$ désigne la fonction Q de Gaussienne.

Efficacité spectrale

Dans notre schéma SSK, l'efficacité spectrale (SE) est définie par $\beta = \log_2(N_t)$. Cette relation indique que l'efficacité spectrale croît logarithmiquement à mesure que le nombre d'antennes augmente. Par conséquent, en augmentant le nombre d'antennes N_t , l'efficacité spectrale du schéma SSK s'améliore, soulignant ainsi l'avantage de tirer parti d'un plus grand réseau d'antennes dans le système.

4.2.2 Analyse des signaux radar et d'écho

La forme d'onde radar transmise est considérée comme une onde continue modulée en fréquence linéaire (FMCW). Le signal d'écho reçu par le radar est donné par

$$s_{\text{echo}}(t) = A_r(t) \exp(j2\pi(f_{\text{beat}}t + \phi)), \quad (4.21)$$

où $A_r(t)$, f_{beat} , et ϕ sont respectivement le terme d'amplitude, la fréquence de battement et le terme de phase.

La fréquence de battement pour les signaux à montée et descente de fréquence (up-chirp et down-chirp) peut être exprimée comme suit

$$f_{\text{beat,up}} = \frac{\Delta F}{T} \cdot \frac{4R}{c} - \frac{2V_r}{\lambda}, \quad (4.22)$$

$$f_{\text{beat,down}} = \frac{\Delta F}{T} \cdot \frac{4R}{c} + \frac{2V_r}{\lambda}, \quad (4.23)$$

où R , V_r , c , et λ sont respectivement la distance cible, la vitesse de la cible, la vitesse de la lumière et la longueur d'onde du signal.

En raison du couplage entre la distance et le Doppler, un problème d'ambiguïté se pose dans les estimations de la vitesse et de la distance des cibles en mouvement [88]. Les formes d'onde LFM triangulaires et V-LFM créées par la combinaison des signaux up-chirp et down-chirp éliminent ce problème car les composantes de vitesse se neutralisent mutuellement dans l'équation de la fréquence de battement f_{beat} .

L'enveloppe complexe de l'impulsion LFM triangulaire et de l'impulsion V-LFM peut être exprimée comme suit

$$\tilde{x}_{\text{tri-LFM}}(t) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{2T}} \text{rect}\left(\frac{t}{2T}\right) e^{j\pi\mu t^2}, & -T < t < 0, \\ \sqrt{\frac{1}{2T}} \text{rect}\left(\frac{t}{2T}\right) e^{-j\pi\mu t^2}, & 0 < t < T, \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.24)$$

$$\tilde{x}_{\text{V-LFM}}(t) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{2T}} \text{rect}\left(\frac{t}{2T}\right) e^{-j\pi\mu t^2}, & -T < t < 0, \\ \sqrt{\frac{1}{2T}} \text{rect}\left(\frac{t}{2T}\right) e^{j\pi\mu t^2}, & 0 < t < T, \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.25)$$

où $\tilde{x}_{\text{tri-LFM}}(t)$ et $\tilde{x}_{\text{V-LFM}}(t)$ font référence à l'enveloppe complexe de l'impulsion LFM triangulaire et de l'impulsion V-LFM, respectivement.

Enfin, lorsque les formes d'onde combinées sont utilisées, la distance et la vitesse peuvent être estimées sans ambiguïté comme dans les équations 4.26 et 4.27 en ajoutant/soustrayant les équations 4.22 et 4.23.

$$\hat{R} = \frac{Tc}{8\Delta F} (f_{\text{beat,down}} + f_{\text{beat,up}}) \quad (4.26)$$

$$\hat{V}_r = \frac{\lambda}{4} (f_{\text{beat,down}} - f_{\text{beat,up}}) \quad (4.27)$$

L'exactitude de la détection peut être évaluée à l'aide du critère de Neyman-Pearson avec un seuil dérivé comme suit

$$\text{Seuil} = P_n \cdot \gamma, \quad \gamma = Q^{-1}(1 - P_{FA}), \quad (4.28)$$

où P_{FA} est la probabilité d'alarme fausse et P_n la puissance du bruit. L'exactitude pour l'estimation de la portée et de la vitesse est calculée comme suit :

$$R_{\text{accuracy}}(\%) = 100 - \frac{|R - \hat{R}|}{R} \times 100 \quad (15)$$

$$V_{\text{accuracy}}(\%) = 100 - \frac{|V_r - \hat{V}_r|}{V_r} \times 100 \quad (16)$$

La fonction d'ambiguïté, qui caractérise la résolution portée-Doppler de la forme d'onde

radar, est définie par

$$|\chi(\tau, f_d)|^2 = \left| \int_{-\infty}^{\infty} x(t)x^*(t - \tau)e^{-j2\pi f_d t} dt \right|^2, \quad (4.29)$$

où τ est le délai temporel qui est proportionnel à la portée et f_d est le décalage de fréquence Doppler qui est proportionnel à la vitesse.

La forme d'onde proposée atteint une résolution portée-Doppler supérieure en combinant les signaux de montée et de descente de fréquence, atténuant ainsi les effets de couplage. Ces métriques valident la robustesse de la forme d'onde pour la détection des débris spatiaux dans des environnements dynamiques LEO.

4.3 Résultats numériques

Les résultats théoriques et de simulation du système ISAC proposé sont présentés et discutés dans cette section, accompagnés des informations et conclusions nécessaires. Des simulations de Monte Carlo sont utilisées pour l'évaluation des performances, avec tous les expérimentations réalisées sur 1×10^6 réalisations indépendantes de canaux afin d'assurer la fiabilité statistique. Conformément aux schémas conventionnels, le SNR est représenté sous la forme E_b/N_0 , où $E_b = |x_k|^2 = 1$ désigne l'énergie par symbole. Les principaux paramètres de simulation sont listés dans le tableau 4.1. Nous supposons un canal en ligne de vue (LOS) entre le satellite LEO et la station au sol (GS).

TABLEAU 4.1 Paramètres de simulation

Paramètre	Valeur/Description
Fréquence d'échantillonnage (f_s)	28.8 MHz
Nombre d'antennes de transmission (N_t)	4, 8, 16, 32
Intervalle SNR [dB]	[0, 25]
Modèle de canal	Canal Rician : - Facteur de Rician $K = 10$
Variance du bruit	Calculée à partir du SNR comme $\sigma^2 = 10^{-\text{SNR}/10}$
Bande passante (BW)	10 MHz
Fréquence porteuse (f_c)	5 GHz (dans la bande C)
Altitude du satellite (h_0)	780 km
Angle d'élévation (θ_E)	60°, c'est-à-dire $d = 884.85$ km
Affaiblissement dû à l'ombre (σ_{SF})	1
Atténuation du zénith (A_{zenith})	0.22
Perte due à la scintillation (L_s)	0.13 dB (cas le plus défavorable)
Paramètre de distribution Rician (σ_R)	1
Paramètre de forme (m)	0.8
Paramètre de dispersion (Ω)	1
Vitesse Doppler (v)	100 km/s
Angle Doppler (α)	30°
Distance entre le satellite LEO et la GS (d)	884.85 km
Paramètres des débris aléatoires	Plage $R \in [500, 2500]$ km depuis le satellite LEO. Vitesse $V_r \in [7000, 8500]$ m/s

Les résultats dans la Fig. 4.4 montrent la performance de la BER du lien de communication entre le satellite LEO émetteur et le récepteur GS. Le graphique montre clairement que la BER diminue légèrement à mesure que le nombre d'antennes d'émission augmente. Cela est attendu, car la plus grande constellation spatiale rend plus difficile pour le récepteur d'identifier précisément l'antenne active, surtout dans les canaux bruyants ou en atténuation. Cependant, l'efficacité spectrale en SSK s'améliore avec le nombre d'antennes d'émission car plus d'antennes permettent de coder un plus grand nombre de bits par symbole, $\log_2(N_t)$, sans nécessiter de bande passante supplémentaire. Il est intéressant de noter que cette figure montre également qu'en utilisant la SSK, les formes d'onde à chirp et sinusoïdales offrent des performances BER pratiquement équivalentes pour un nombre donné d'antennes d'émission N_t . Cette équivalence offre une flexibilité dans le choix de la forme d'onde qui offre la plus grande précision pour la détection ou celle qui permet une conception radar plus simple.

En termes de détection, la Fig. 4.5 présente la capacité de détection du système radar utilisant des formes d'onde sinusoïdales et chirp, en fonction de différents niveaux de SNR. Les résultats montrent que les deux formes d'onde convergent vers une précision de vitesse quasi parfaite (100 %) lorsque le SNR dépasse 10 dB. Pour la détection de distance, seule la forme d'onde chirp est considérée, car la forme d'onde sinusoïdale n'est pas adaptée en raison de sa forte ambiguïté, rendant une estimation précise de la distance impraticable. La précision de détection de la distance avec les formes d'onde chirp s'améliore avec l'augmentation du SNR,

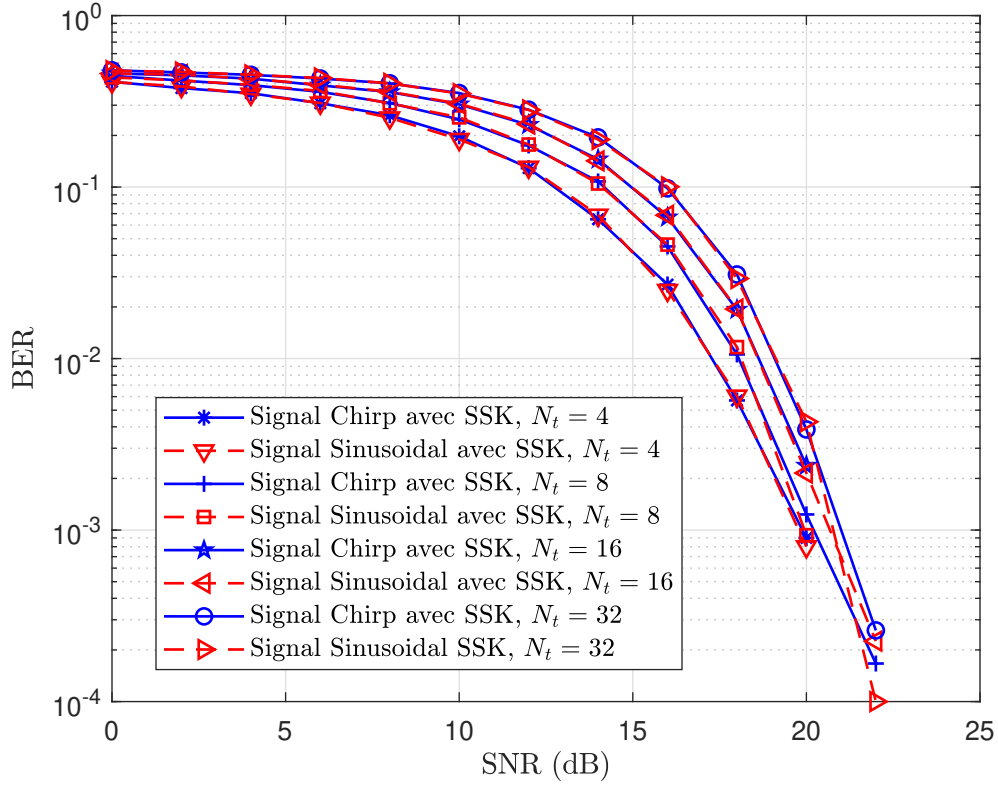


FIGURE 4.4 Taux d'erreur binaire pour $N_t = 4, 8, 16$ et 32 , canal de Rice

mais atteint un plafond autour de 70 %, indiquant une limite de performance même à SNR élevé. De manière générale, les formes d'onde chirp offrent de meilleures capacités de détection, tandis que les formes d'onde sinusoïdales permettent une conception radar plus simple. Ces résultats mettent en évidence la flexibilité des formes d'onde à chirp pour s'adapter aux conditions du canal et obtenir une performance de détection optimale.

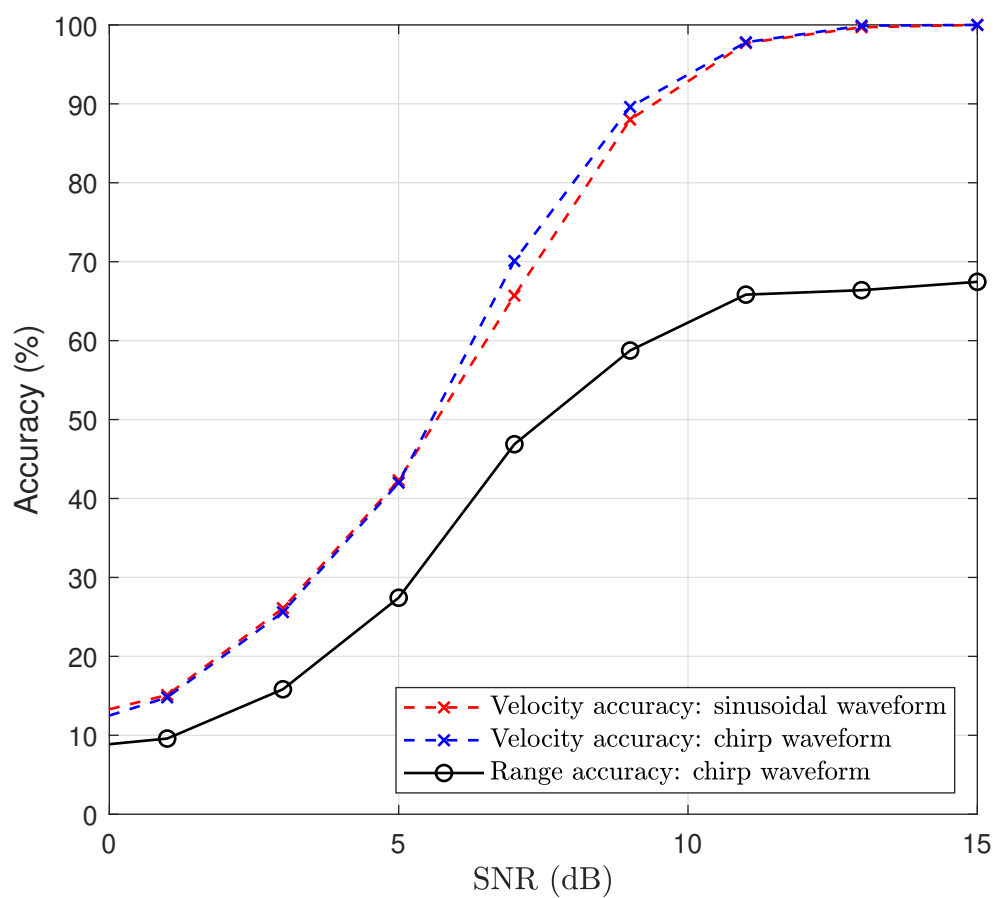


FIGURE 4.5 Comparaison de la précision de la portée et de la vitesse entre les formes d'onde chirp et sinusoïdales.

CHAPITRE 5 CONCLUSION

Ce chapitre se propose de faire une synthèse des travaux menés le long de ce mémoire tout en exposant ces limitations et les recommandations futures pour d'éventuelles possibilités d'améliorations.

5.1 Synthèse des travaux

Cet mémoire a exploré l'intégration de la modulation SSK dans les systèmes ISAC utilisant différentes formes d'onde radar. Les résultats confirment que la modulation SSK permet une communication fiable aussi bien avec des formes d'onde chirp que sinusoïdales, celles-ci offrant des performances BER comparables. Cependant, le choix de la forme d'onde joue un rôle crucial dans les performances de détection. Bien que la forme d'onde sinusoïdale bénéficie d'une conception plus simple, sa forte ambiguïté la rend inadaptée à la détection de distance. En revanche, la forme d'onde chirp permet la détection de distance et offre une légère amélioration de la précision de détection de vitesse. Ces résultats mettent en évidence les rôles complémentaires de la modulation SSK et du choix de la forme d'onde dans les systèmes ISAC, la modulation SSK assurant l'efficacité de la communication, tandis que la sélection de la forme d'onde détermine l'efficacité de la détection. Ensemble, elles offrent une flexibilité de conception pour des solutions ISAC évolutives et adaptées aux missions, notamment dans des applications telles que la détection de débris orbitaux et la surveillance de la situation spatiale.

5.2 Améliorations futures

Les travaux futurs se concentreront sur l'optimisation de l'évolutivité du système, sur la résolution des défis liés à la synchronisation dans les scénarios à haute mobilité, et sur l'intégration d'algorithmes adaptatifs avancés basés sur l'IA pour améliorer davantage les performances dans des environnements orbitaux de plus en plus complexes. Les perspectives de recherche identifiées dans ce mémoire ouvrent de nombreuses pistes pour étendre et améliorer les systèmes ISAC :

- **Évolutivité et optimisation multi-niveaux** : Développer des architectures ISAC adaptées aux constellations massives de satellites, intégrant des mécanismes de gestion des ressources distribuées et d'évolutivité spectrale.
- **Synchronisation avancée** : Résoudre les défis liés à la synchronisation dans des en-

vironnements à haute mobilité, en combinant des techniques de compensation Doppler et des algorithmes de suivi adaptatifs.

- **Apprentissage automatique** : Intégrer des algorithmes basés sur l’IA pour améliorer la précision de détection et d’identification des débris, tout en optimisant les formes d’ondes en temps réel en fonction des conditions du canal.
- **Nouvelles formes d’onde** : Explorer des formes d’onde hybrides combinant les avantages des signaux LFM, OFDM et de la modulation par index, afin de maximiser l’efficacité spectrale et la précision radar.
- **Applications élargies** : Investiguer des applications interdisciplinaires, telles que la surveillance environnementale, les communications sous-marines et les réseaux IoT spatiaux, pour diversifier les domaines d’application des systèmes ISAC.

Ces axes de recherche contribueront à renforcer les capacités des systèmes ISAC et à garantir leur pertinence pour les défis futurs en matière de gestion des débris spatiaux et d’amélioration des communications orbitales.

Article soumis :

- G. G. N. Ngoufo, K. Humadi, E. Baladi, and G. K. Kurt, “Space shift keying-enabled ISAC for efficient debris detection and communication in LEO satellite networks,” *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, April 2025.

RÉFÉRENCES

- [1] ESA Space Debris Office, *Classification of Geosynchronous Objects, Issue 26*. Darmstadt, Germany : European Space Agency (ESA), July 2024, p. GEN-DB-LOG-00 290-OPS-SD, latest space environment report by ESA. [En ligne]. Disponible : https://www.sdo.esoc.esa.int/environment_report
- [2] E. S. Agency, “Space debris by the numbers,” *ESA Report*, 2021.
- [3] J. N. Pelton, “The space debris threat and the kessler syndrome,” *Advances in Space Research*, p. 17–23, 2023, Discussion on space debris and cascading collisions in orbit. [En ligne]. Disponible : https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6714-4_2
- [4] D. McKnight et al., “The impact of mega-constellations on the orbital debris environment,” *Proceedings of the International Astronautical Congress*, 2020.
- [5] B. C. Weeden et al., “Space traffic management and the challenges of mega-constellations,” *Journal of Space Safety Engineering*, vol. 7, n^o. 3, p. 174–180, 2020.
- [6] H. G. Lewis et al., “The long-term impacts of satellite constellations and debris,” *Acta Astronautica*, vol. 170, p. 34–40, 2020.
- [7] P. Krisko et al., “Advancements in active debris removal technologies,” *Space Policy*, vol. 58, p. 101413, 2021.
- [8] L. Leushacke et al., “Radar techniques for space debris detection in leo,” *IEEE Aerospace Conference*, p. 14, 2019.
- [9] M. Liu, H. Wang, H. Yi, Y. Xue, D. Wen, F. Wang, Y. Shen et Y. Pan, “Space debris detection and positioning technology based on multiple star trackers,” *Applied Sciences*, vol. 12, n^o. 7, 2022. [En ligne]. Disponible : <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/7/3593>
- [10] C. R. Phipps, C. Bonnal, F. Gardiol, S. Jorba et T. Bagdonat, “Laser ablation for space debris removal : Technology and feasibility,” *Aerospace*, vol. 7, n^o. 4, p. 89, 2020. [En ligne]. Disponible : <https://www.mdpi.com/2226-4310/7/4/89>
- [11] M. Shan et L. Shi, “Development of a harpoon system for space debris removal,” *Aerospace*, vol. 9, n^o. 2, p. 105, 2022. [En ligne]. Disponible : <https://www.mdpi.com/2226-4310/9/2/105>
- [12] M. Akhtar et al., “Ai-augmented rf detection of small-scale debris,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, n^o. 8, p. 10 402–10 412, 2021.
- [13] M. Nussbaum, E. Schafer, Z. Yoon, D. Keil et E. Stoll, “Spectral light curve simulation for parameter estimation from space debris,” *Aerospace*, vol. 9, n^o. 8, 2022. [En ligne]. Disponible : <https://www.mdpi.com/2226-4310/9/8/403>
- [14] F. Massimi, P. Ferrara, R. Petrucci et F. Benedetto, “Deep learning-based space debris detection for space situational awareness : A feasibility study applied to the radar processing,”

- IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 18, n°. 4, p. 635–648, 2024. [En ligne]. Disponible : <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1049/rsn2.12547>
- [15] L. Yin, Z. Liu, M. B. Shankar, M. Alae-Kerahroodi et B. Clerckx, “Integrated sensing and communications enabled low earth orbit satellite systems,” *IEEE Network*, 2024.
 - [16] F. Liu, Y. Cui, C. Masouros, J. Xu, T. X. Han, Y. C. Eldar et S. Buzzi, “Integrated sensing and communications : Toward dual-functional wireless networks for 6g and beyond,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 40, n°. 6, p. 1728–1767, 2022.
 - [17] F. Liu et al., “Single carrier waveforms for joint radar and communication systems,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 27, n°. 3, p. 164–170, 2020.
 - [18] B. Tang et al., “Sc waveforms for integrated vehicular communication and sensing systems,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, n°. 8, p. 7719–7731, 2019.
 - [19] A. Hanif, S. Ahmed, M.-S. Alouini et T. Y. Al-Naffouri, “Exploring the synergy : A review of dual-functional radar communication systems,” *arXiv preprint arXiv :2401.00469*, 2023.
 - [20] Z. Xiao et Y. Zeng, “Integrated sensing and communication with delay alignment modulation,” *arXiv preprint arXiv :2206.03714*, 2022.
 - [21] Z. Wei et al., “A 5g dmrs-based signal for integrated sensing and communication system,” *arXiv preprint arXiv :2312.02170*, 2024.
 - [22] K. Wu et al., “Sensing in bi-static isac systems with clock asynchronism : A signal processing perspective,” *arXiv preprint arXiv :2402.09048*, 2024.
 - [23] Z. Liao, F. Liu et S. Li, “Improving the ranging performance of random isac signals through pulse shaping design,” *arXiv preprint arXiv :2405.03597*, 2024.
 - [24] T. Xu, F. Liu et C. Masouros, “An experimental proof of concept for integrated sensing and communications waveform design,” *IEEE Open Journal of Communications*, 2022.
 - [25] J. Zhao, Z. Lu et J. A. Zhang, “Performance bounds for passive sensing in asynchronous isac systems,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024.
 - [26] Z. Xiao et Y. Zeng, “Waveform design and performance analysis for full-duplex integrated sensing and communication,” *arXiv preprint arXiv :2108.06449*, 2021.
 - [27] Z. Wei et al., “Waveform design for mimo-ofdm integrated sensing and communication system : An information theoretical approach,” *arXiv preprint arXiv :2310.04567*, 2023.
 - [28] S. K. Dehkordi et al., “Integrated sensing and communication with mocz waveform,” *arXiv preprint arXiv :2307.01760*, 2023.
 - [29] C. Sturm, T. Zwick et W. Wiesbeck, “An ofdm system concept for joint radar and communications operations,” dans *VTC Spring 2009 - IEEE 69th Vehicular Technology Conference*, 2009, p. 1–5.
 - [30] R. Hadani, S. Rakib, M. Tsatsanis, A. Monk, A. J. Goldsmith, A. F. Molisch et R. Calderbank, “Orthogonal time frequency space modulation,” dans *2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2017, p. 1–6.

- [31] A. M. Elbir, A. Celik, A. M. Eltawil et M. G. Amin, “Index modulation for integrated sensing and communications : A signal processing perspective,” *arXiv*, 2024. [En ligne]. Disponible : <https://arxiv.org/abs/2401.08186>
- [32] S. Lu, F. Liu, Y. Li, K. Zhang, H. Huang, J. Zou, X. Li, Y. Dong, F. Dong, J. Zhu, Y. Xiong, W. Yuan, Y. Cui et L. Hanzo, “Integrated sensing and communications : Recent advances and ten open challenges,” *arXiv*, 2023. [En ligne]. Disponible : <https://arxiv.org/abs/2305.00179>
- [33] F. Zhang, T. Mao *et al.*, “Cross-domain multicarrier waveform design for integrated sensing and communication,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024.
- [34] S. Li, W. Yuan, C. Liu *et al.*, “A novel isac transmission framework based on spatially-spread orthogonal time frequency space modulation,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 40, n^o. 6, p. 1854–1867, 2022.
- [35] W. Zhou, W. Wang, W. Qi et R. Zhang, “A deep model-based channel interference mitigation for ofds signals in isac systems,” *Electronics Letters*, 2024.
- [36] D. Tagliaferri, M. Mizmizi *et al.*, “Integrated sensing and communication system via dual-domain waveform superposition,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 23, n^o. 5, p. 4284–4299, 2024.
- [37] J. C. Hyeon Seok Rou, Giuseppe T. F. de Abreu *et al.*, “From ofds to afdm : A comparative study of next-generation waveforms for isac in doubly-dispersive channels,” *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 41, p. 23–34, 2024.
- [38] A. M. Elbir *et al.*, “Spatial path index modulation for mmwave/thz isac systems,” *IEEE Transactions on Communications*, 2024.
- [39] J. Hawkins *et al.*, “Im-ofdm isac : Combining sensing observations for enhanced performance,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2024.
- [40] Z. Yang *et al.*, “Superposed im-ofdm : An enhanced ofdm for integrated sensing and communications,” *arXiv preprint arXiv :2403.13314*, 2024.
- [41] H. S. Rou *et al.*, “Massive index modulation with combinatorics-free detection for integrated sensing and communications,” *arXiv preprint arXiv :2407.08087*, 2024.
- [42] S. Guo *et al.*, “Non-uniform beam pattern modulation for joint sensing and communication in 6g networks,” dans *1st ACM MobiCom Workshop on Integrated Sensing and Communications Systems*, 2022.
- [43] B. Liu *et al.*, “Beam pattern modulation embedded hybrid transceiver optimization for integrated sensing and communication,” *arXiv preprint arXiv :2405.09778*, 2024.
- [44] X. Li *et al.*, “A novel isac transmission framework based on spatially-spread orthogonal time frequency space modulation,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022.
- [45] X. Jin *et al.*, “Ris assisted dual-function radar and secure communications based on frequency-shifted chirp spread spectrum index modulation,” *China Communications*, vol. 20, n^o. 10, p. 85–99, 2023.

- [46] M. Temiz *et al.*, “Radar-centric isac through index modulation : Over-the-air experimentation and trade-offs,” *IEEE Radar Conference*, 2023.
- [47] X. Gao et al., “Deep learning for joint communication and radar sensing,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, n^o. 9, p. 47–53, 2020.
- [48] B. Li, “Advances in radar signal processing : Integrating deep learning approaches,” *Highlights in Science, Engineering and Technology*, vol. 97, p. 40–45, 05 2024.
- [49] H. Geng, F. Wu, X. Zhuang, L. Geng, B. Xie et Z. Shi, “The ms-radarformer : A transformer-based multi-scale deep learning model for radar echo extrapolation,” *Remote Sensing*, vol. 16, p. 274, 01 2024.
- [50] F. J. Abdu, Y. Zhang, M. Fu, Y. Li et Z. Deng, “Application of deep learning on millimeter-wave radar signals : A review,” *Sensors*, vol. 21, n^o. 6, 2021. [En ligne]. Disponible : <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/6/1951>
- [51] W. Yang, Y. Zhao, M. Liu et D. Liu, “Method of space object detection by wide field of view telescope based on its following error,” *Opt. Express*, vol. 29, n^o. 22, p. 35 348–35 365, Oct 2021. [En ligne]. Disponible : <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-29-22-35348>
- [52] M. Liu, H. Wang, H. Yi, Y. Xue, D. Wen, F. Wang, Y. Shen et Y. Pan, “Space debris detection and positioning technology based on multiple star trackers,” *Applied Sciences*, vol. 12, n^o. 7, p. 3593, 2022.
- [53] J. Xi, Y. Xiang, O. K. Ersoy, M. Cong, X. Wei et J. Gu, “Space debris detection using feature learning of candidate regions in optical image sequences,” *IEEE Access*, vol. 8, p. 150 864–150 877, 2020.
- [54] J. Tao, Y. Cao, L. Zhuang, Z. Zhang et M. Ding, “Deep convolutional neural network based small space debris saliency detection,” dans *2019 25th International Conference on Automation and Computing (ICAC)*. IEEE, 2019, p. 1–6.
- [55] B. Oakes, D. Richards, J. Barr et J. Ralph, “Double deep q networks for sensor management in space situational awareness,” dans *2022 25th International Conference on Information Fusion (FUSION)*. IEEE, 2022, p. 1–6.
- [56] P. M. Siew et R. Linares, “Optimal tasking of ground-based sensors for space situational awareness using deep reinforcement learning,” *Sensors*, vol. 22, n^o. 20, p. 7847, 2022.
- [57] O. Daoust, H. Nayir, I. Azam, A. Lesage-Landry et G. K. Kurt, “Tensor-based space debris detection for satellite mega-constellations,” dans *2024 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, 2024, p. 1926–1931.
- [58] J. Zhang, S. Guo, S. Gong, C. Xing, N. Zhao, D. W. K. Ng et D. Niyato, “Intelligent waveform design for integrated sensing and communication,” *IEEE Wireless Communications*, p. 1–8, 2024.
- [59] Z. Yang, S. Gao et X. Cheng, “Doubly-dynamic isac precoding for vehicular networks : A constrained deep reinforcement learning (cdrl) approach,” 2024. [En ligne]. Disponible : <https://arxiv.org/abs/2405.14347>

- [60] L. Xu, S. Sun, Y. D. Zhang et A. P. Petropulu, “Reconfigurable beamforming for automotive radar sensing and communication : A deep reinforcement learning approach,” *IEEE Journal of Selected Areas in Sensors*, vol. 1, p. 124–138, 2024.
- [61] Y. Fan, Z. Fei, J. Huang et X. Wang, “Reinforcement learning-based resource allocation for multiple vehicles with communication-assisted sensing mechanism,” *Electronics*, vol. 13, n^o. 13, p. 2442, 2024.
- [62] Y. Wang, W. Li, J. Ding, J. Zhang, M. Zhu, F. Zhao, M. Wang et J. Yu, “Integrated high-resolution radar and long-distance communication based-on photonic in terahertz band,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 40, n^o. 9, p. 2731–2738, 2022.
- [63] Q. Zhang, Z. Li, X. Gao et Z. Feng, “Performance evaluation of radar and communication integrated system for autonomous driving vehicles,” dans *IEEE INFOCOM 2021 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, 2021, p. 1–2.
- [64] J. Zhang, S. Wang, Z. Zheng, Z. Fei, H. Yu, Q. Zhang et Z. Han, “Enhancing performance of integrated sensing and communication via joint optimization of hybrid and passive reconfigurable intelligent surfaces,” *IEEE Internet of Things Journal*, p. 1–1, 2024.
- [65] Y. Chen et al., “Sdr-based prototyping of isac systems,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 71, n^o. 4, p. 2984–2994, 2022.
- [66] F. Verde, V. Galdi, L. Zhang et T. J. Cui, “Integrating sensing and communications : Simultaneously transmitting and reflecting digital coding metasurfaces,” *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. Special Issue on Signal Processing for the Integrated Sensing and Communications Revolution, September 2024.
- [67] A. Javali, J. Gupta et A. Sahoo, “A review on synthetic aperture radar for earth remote sensing : Challenges and opportunities,” dans *2021 Second International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC)*, 2021, p. 596–601.
- [68] H. Dong et O. B. Akan, “Debrisense : Terahertz-based integrated sensing and communications (isac) for debris detection and classification in the internet of space (ios),” *arXiv preprint*, vol. 2408.13552, 2024. [En ligne]. Disponible : <https://arxiv.org/abs/2408.13552>
- [69] G. K. K. Gizem Sümen et A. Görçin, “A novel lfm waveform for terahertz-band joint radar and communications over inter-satellite links,” *arXiv preprint*, vol. 2205.12155v2, 2022. [En ligne]. Disponible : <https://arxiv.org/abs/2205.12155>
- [70] R. Thomä et T. Dallmann, “Distributed isac systems – multisensor radio access and coordination,” dans *2023 20th European Radar Conference (EuRAD)*, 2023, p. 351–354.
- [71] S. Zhang, Z. Xiao, R. Liu, M. Li, W. Wang et Q. Liu, “Multipath exploitation for fluctuating target detection in ris-assisted isac systems,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 13, n^o. 9, p. 2392–2396, 2024.
- [72] M. Maffei, A. Aubry, De Maio et A. Farina, “An ontology for spaceborne radar debris detection and tracking : Channel-target phenomenology and motion models,” *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 36, n^o. 6, p. 18–42, 2021.

- [73] V. Karamanavis, H. Dirks, L. Fuhrmann, F. Schlichthaber, N. Egli, T. Patzelt et J. Klare, “Characterization of deorbiting satellites and space debris with radar,” *Advances in Space Research*, vol. 72, n^o. 8, p. 3269–3281, 2023. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117723005689>
- [74] E. S. A. (ESA), “Detecting, tracking and imaging space debris,” *ESA Bulletin*, vol. 109, 2002. [En ligne]. Disponible : https://www.esa.int/esapub/bulletin/bullet109/chapter16_bul109.pdf
- [75] M. Maffei, A. Aubry, A. De Maio et A. Farina, “Spaceborne radar sensor architecture for debris detection and tracking,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 59, n^o. 8, p. 6621–6636, 2021.
- [76] I. T. U. (ITU), *Characteristics of and protection criteria for radars operating in the radiodetermination service in the frequency band 1 215-1 400 MHz*, 2015. [En ligne]. Disponible : https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1463-3-201502-I%21%21PDF-E.pdf
- [77] J.-F. Degurse, P. Richard, R. Guillaumet, J. Guegan, G. Point, E. Centofanti, A. Peden, V. Muller et Y. Audic, “Radar detection and classification of minidrones using a lightweight neural network,” dans *Open Science*, 11 2023.
- [78] X. Zhai, L. Xiao, T. Ding, J. Zhou, P. Xiao et T. Jiang, “Golden angle modulation aided differential OFDM-IM for LEO satellite communications,” *IEEE Communications Letters*, vol. 28, n^o. 7, p. 1604–1608, July 2024.
- [79] J. S. Yeom, Y. Lee et B. C. Jung, “Mmse-based mimo receiver for cooperative downlink noma in leo satellite networks,” dans *Proceedings of the 13th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, 2023, p. 1650–1652.
- [80] C. Zhang, Q. Wu, Y. Liu, B. K. Ng et C.-T. Lam, “What roles can spatial modulation and space shift keying play in LEO satellite-assisted communication?” *arXiv preprint arXiv :2409.17553*, 2024. [En ligne]. Disponible : <https://arxiv.org/abs/2409.17553>
- [81] W. Zhou et R. Zhang, “Integrated sensing and communication waveform design : A survey,” *IEEE Open Journal of Communications*, 2024.
- [82] P. Raviteja et et al., “Otf modulation for high-mobility applications : An overview,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, n^o. 5, p. 4344–4356, 2019.
- [83] G. Fettweis et et al., “Gfdm : A new waveform for 5g and beyond,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, n^o. 6, p. 164–171, 2020.
- [84] C. M. S. Aquino, B. Cheong et R. D. Palmer, “Progressive pulse compression : A novel technique for blind range recovery for solid-state radars,” *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 38, n^o. 9, p. 1599–1611, 2021. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-20-0164.1>
- [85] S. Saini et A. Chockalingam, “Performance of RIS-aided media-based modulation with imperfect CSI and phase tuning errors,” dans *Proceedings of the IEEE 31st Annual International*

- Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. IEEE, 2023, p. 1–6.
- [86] H. Raj, U. Singh et B. R. Manoj, “On the performance of irs-assisted ssk and rpm over rician fading channels,” dans *Proceedings of the 2024 IEEE 99th Vehicular Technology Conference (VTC2024-Spring)*. IEEE, 2024, p. 1–5. [En ligne]. Disponible : <https://arxiv.org/abs/2404.07044>
- [87] Q. Li, M. Wen, S. Wang, G. C. Alexandropoulos et Y.-C. Wu, “Space shift keying with reconfigurable intelligent surfaces : Phase configuration designs and performance analysis,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, n^o. 6, p. 3870–3884, 2020.
- [88] M. Mitsumoto, T. Kirimoto, N. Uehara et S. Inatsune, “FMCW automotive radars using only in-phase channel,” *SAE Transactions*, p. 906–912, 1999.